

GERBERTVS accoglie lavori sul papa astronomo, docente e matematico, musicista, filosofo Gerberto d'Aurillac Silvestro II e su temi di scienza medievale e didattica.



GERBERTVS 19

è dedicato agli atti del Convegno Copernico e Gregorio XIII tenuto all'Ateneo Regina Apostolorum il 24 febbraio 2023 in occasione del 550° della nascita di Copernico e del 441° della Bolla *Inter Gravissimas* sulla riforma del Calendario.

Include gli studi astrometrici e sperimentalni per l'eclissi solare ibrida del 20 aprile 2023: tra queste righe si vedono tre *beads ghost*.

Prof. Costantino Sigismundi Editor

GERBERTVS

19

2023

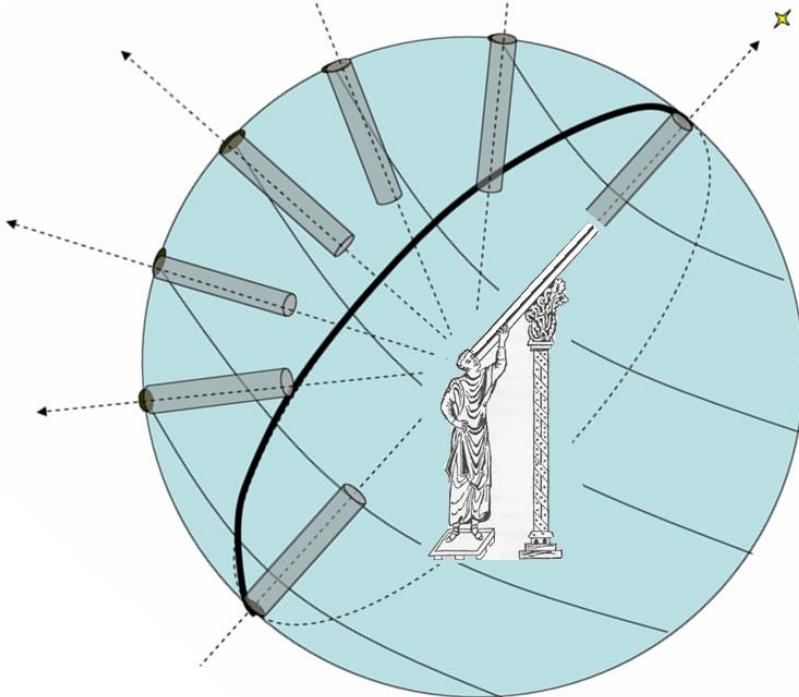
GERBERTVS

<http://www.icra.it/gerbertus>

International academic online publication
on History of Medieval Science and Didactic
Vol. 19/ 2023



GERBERTVS



<http://www.icra.it/gerbertus>

International academic online publication
on History of Medieval Science and Didactic
vol. 19/2023

GERBERTVS

International academic online publication on History of Medieval Science

url: <http://www.icra.it/gerbertus>

Editorial Board:

Prof. Cosimo Palagiano (Accademia dei Lincei)

Prof. Paolo Rossi (Università di Pisa)

Prof. Cesare Barbieri (Università di Padova e Scuola Galileiana)

Dr. Marek Otisk (Accademia Ceca delle Scienze, e Ostrawa Un.)

Dr. Paolo Zanna (Oxford University)

Dr.ssa Irene Sigismondi (LUISS e Sapienza Università di Roma)

Publisher: Prof. Costantino Sigismondi

(ICRANet, Ateneo Pontificio Regina Apostolorum e

ITIS G. Ferraris, Roma)

Via Riccardo Grazioli Lante 15/A 00195 Roma, Italia

Copertina: Tramonto sul mare a Ostia il 1 novembre 2020 ;
Transito meridiano sull'Obelisco Vaticano il 14 aprile 2023
con tre perle di luce distinguibili nella ghost image verdognola

ISSN 2038-3657 (versione stampata)

ISSN 2038-355X (versione online)

ISSN 2038-3630 (CD-ROM)

Vol. 18– 2022

Finito di stampare nel mese di aprile 2023

Con il contributo degli
Amici del Morgagni



Il Sole nell'Acquario, trigonometria sferica in meridiano

Costantino Sigismonti prof.sigismonti@icra.it

(ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma)

Submitted January 17th 2023, revised and accepted January 21st 2023

Abstract With the solar transit measured in Local Sidereal Time through the Vatican obelisk meridian line, and the differential measure of the solar declination, we calculate the ingress of the Sun in Aquarium zodiacal sign.

Sommario Misurando il transito meridiano del Sole, convertendolo in Tempo Siderale Locale, e la sua declinazione alla meridiana dell'obelisco Vaticano, calcoliamo l'ingresso nel segno zodiacale dell'Acquario del Sole.

Keywords: Meridian line, San Pietro in Vatican, Tropic, Solstice, Refraction, Earth's Rotation, Positional Astronomy, azimut

Introduzione: L'ingresso del Sole nei segni zodiacali, è uno degli eventi che si capiscono veramente solo con la meccanica celeste e la trigonometria sferica. *Domare i cavalli del Sole*, è un'espressione che prendo da Giandomenico Cassini (1625-1712), che nel 1656 dopo il primo anno di osservazioni alla meridiana di san Petronio a Bologna, ottenne la formula $\Delta z=60''\tan(z)$ con cui quantificava l'influenza rifrattiva dell'aria sulla posizione osservata del Sole e di qualunque stella nella fascia tra 20° e 70° di altezza sopra l'orizzonte.

Sole nell'Acquario

L'Ingresso nell'Acquario, avviene con il Sole 30° di longitudine eclittica dopo il solstizio invernale e 60° prima dell'equinozio vernale (di primavera), il punto γ d'Ariete. Una meridiana ci permette di misurare 1) l'istante di passaggio in meridiano del Sole e 2) quello di una stella "fissa" 3) l'altezza meridiana del Sole e della stella fissa. Tramite questi dati esaminiamo gli algoritmi che portano alla determinazione dei 12 settori dell'orbita solare che prendono il nome di segni zodiacali. Cocco di partire dai dati sperimentali di piazza s. Pietro, perché sono sempre interessato agli strumenti storici e a come si è sviluppata la precisione della meccanica celeste.

Dati del 19 e 21 gennaio 2023: L'istante in cui il Sole è centrato rispetto al monte più alto di quelli araldici è compreso tra le 12:20:09 (osservazione in proiezione senza mediare su due

tempi, normalmente è quella con più errori) e le **12:20:13** (osservazioni tramite ghost image).¹ La meridiana è in anticipo di 32 secondi, poiché le effemeridi danno il passaggio in meridiano alle 12:20:45. Quelle calcolate per la sommità della croce davano le 12:20:23, quindi alla sommità dei tre monti abbiamo trovato ulteriori 10 secondi di anticipo, dovuti alla pendenza verso Ovest della croce sommitale. Il 21 gennaio 2023 è passato sulla stella alle 12:20:52.6 in anticipo di 29.1 s.²



Fig. 1 Posizioni del Sole al meridiano in giallo rispetto ai finimenti dell'obelisco Vaticano il 19 e 21 gennaio 2023 e 20 XI.

¹ https://youtu.be/Cip_AwMfVpc video del transito del 19 gennaio 2023

² <https://youtu.be/Kxbzb3j3vA> transito 21 gen 2023 con telescopio 14x25

La foto è delle 12:45 del 18 gennaio 2023, 6.6° offaxis rispetto alla meridiana, serve ad avere il confronto col diametro angolare del Sole senza sovraesposizioni. L'asimmetria dei finimenti bassi complica le misure di tempo. La posizione che il Sole avrebbe se fosse in meridiano all'ingresso in Acquario è in bianco. L'osservazione di riferimento è quella del 20 novembre 2021 col telescopio posto sulla meridiana e la sua ombra sulla stella.



Fig. 2 Transito del 20 novembre 2021 11:55:17 con Sole a 28°20.3' di altezza; il 19 gennaio 2023 è stato a 27° 47.3', ed il 21 gennaio a 28° 13.5'. Lo 0° dell'Acquario avrebbe 28°11.9' e sarebbe raggiunto alle 10:52 del 21 gennaio per interpolazione. Disegnando le immagini del Sole osservate il 20 XI 21 ed il 19 I 23 la loro distanza angolare risulta 33.1' da foto, e 33' da effemeridi. La massima incertezza stimata: se la differenza di posizione con 14 mesi fa fosse attorno ai 5 cm lungo la linea meridiana. Ciò corrisponde a circa 2.5 cm perpendicolarmente alla linea di vista che fino alla stella sommitale è lunga 80 m. L'angolo sotteso è $\theta = \arctan(2.5/8000) = 1'$ ciò significa che la direzione della stella 3-D nel video del 19 gennaio 2023 è entro $\pm 1'$ da quella del 20 novembre 2021.

Questo ci permette di misurare l'altezza meridiana del Sole con una precisione di 1' utilizzando la tecnica delle misure differenziali, cioè prese dallo stesso punto della meridiana,

Tempo siderale e punto γ Martedì 20 dicembre 2022 abbiamo avuto il passaggio di Giove in meridiano alle ore 18:14:50. Giove era $1^\circ 20'$ a Sud del punto γ e ne visualizzava la posizione, ed è transitato alle $18:10:54 \pm 1$ s. Mentre Giove è un pianeta, il punto γ è come una stella fissa, quindi passa in meridiano ogni 23h 56m 4.09 s. Il Tempo Siderale Locale³ al momento del passaggio in meridiano del Sole va sottratto a 24h e convertito in gradi (24h=360°) per ottenere il tempo che manca al passaggio in meridiano del punto γ .

Triangoli rettangoli sferici da risolvere e interpolare

Il punto γ è il vertice del triangolo rettangolo sferico di cui dobbiamo calcolare l'ipotenusa, ossia la distanza in gradi lungo l'eclittica del Sole al momento del suo passaggio in meridiano. Gli altri lati sono la declinazione e la distanza sull'equatore celeste, che è appunto 24h-TSL espresso in gradi.

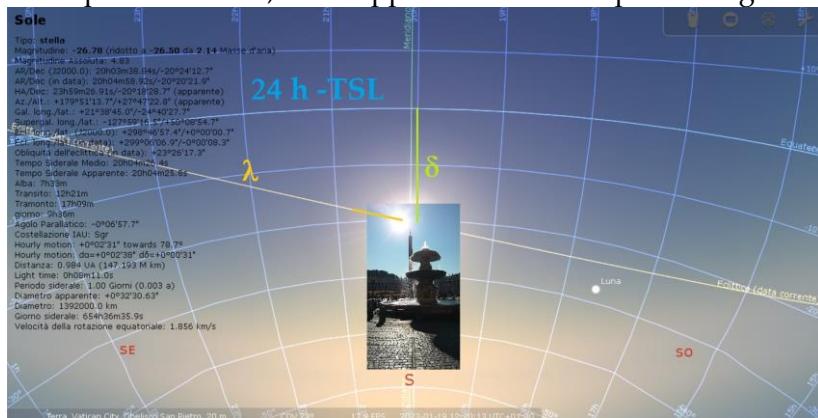


Fig. 3 Il 19 gennaio il transito solare è avvenuto alle 20:04:58 del TSL, cioè ad un angolo di 301.24126° .

$360^\circ - \text{TSL} = 58.75874^\circ$, cateto 1. La declinazione $-\delta$ è $48^\circ 06' - 27^\circ 47.3' - 2'$ (correzione di Cassini) = $20^\circ 16.7'$, cateto 2.

Le formule per i triangoli rettangoli sferici sono le più semplici della trigonometria sferica. I due triangoli rettangoli sferici

³ <https://www.neoprogrammics.com/sidereal-time-calculator/index.php>

sono retti nell'angolo formato dalla linea meridiana e dall'equatore. Vale la formula dei coseni:

cos(ipotenusa) = coseno(cateto1) x coseno(cateto2)

$\cos(\lambda) = \cos(58.75875^\circ) \cdot \cos(20^\circ 20.5') = 0.48630$; $\lambda = 60.90231^\circ$

Alla **velocità media** di $360^\circ/365.25$ giorni, 0.90231° vengono percorsi in 21 h 58 minuti, dopo il transito meridiano. Quindi con questi dati l'ingresso nell'Acquario avverrebbe alle 10:18 del 20 gennaio 2023, 49 minuti dopo di quanto dicono le effemeridi (9:29). L'ipotenusa del triangolo sferico del 21 gennaio vale $\cos(\lambda) = \cos(56.64112^\circ) \cdot \cos(19^\circ 54.3') = 0.51703$; $\lambda = 58.86660^\circ$. Più precisa risulta l'interpolazione tra 19 e 21 gennaio, che porta ad avere $\lambda = 60^\circ$ alle ore 9:37 del 20 gennaio, solo 8 minuti dopo il valore delle effemeridi, un risultato molto accurato: corrisponde ad una precisione di localizzazione del Sole sulla sua orbita pari a $20''$ in longitudine.

Curiosità: la fontana copre con la sua ombra una buona parte della linea meridiana vicino al disco del Sagittario, ma al momento del passaggio meridiano in Acquario/Sagittario il disco è illuminato per quei minuti che servono per fare la misura, dopo di che entra in "eclissi".



Fig. 4-5-6 Il disco dell'Acquario entra in eclissi 5 minuti dopo il passaggio del Sole in meridiano. Foto 19 gen h 12:25:15. E il Sole passa dietro la stella 3D 21 gen 2023 foto delle h 12:20:41.

Chi ha pensato questa cosa era un vero genio, forse è stato proprio il progettista, il vescovo domenicano padre Egnazio Danti nel 1586, ma non poté vederla realizzata, perché morì 40 giorni dopo che l'obelisco era stato spostato, e di conseguenza la meridiana fu fatta fare soltanto nel 1817 dal Cardinale Pietro Maccarani e dall'astronomo don Filippo Luigi Gigli. Danti, dato che la fontana era già in sito nel 1490, può aver progettato i finimenti superiori dell'obelisco in modo che fossero visibili da quel pertugio triangolare che si forma tra le due vasche della fontana e la sommità dell'obelisco stesso.

Sorgenti di errori in questi dati La meridiana non giace né sull'asse di simmetria del monolito né c'è un asse realmente verticale dei finimenti superiori. 32 secondi di anticipo sulle effemeridi sono stati determinati nelle calibrazioni 2020-2022. Il transito può essere determinato entro ± 1 s. La declinazione, disponendo di immagini precedenti e sullo stesso punto della meridiana, può essere determinata al meglio di $1'$, applicando la correzione di Cassini alle altezze meridiane osservate. Queste incertezze portano a ± 5 min per $\pm 1'$ in altezza e ± 5 min per ogni secondo di tempo ± 1 s di incertezza sul transito meridiano che corrisponde a $\pm 24''$ di angolo (24-TSL). Questo è perché la velocità angolare del Sole media di 1° al giorno, è pari a $2.5''$ /minuto lungo l'eclittica.

Conclusioni: abbiamo determinato l'ingresso nel segno nell'Acquario a partire dai tempi di transiti meridiani del Sole e da un solo transito del punto γ (che determina il Tempo Siderale Locale), e dalla misura della declinazione del Sole, fatta a partire dalla sua altezza meridiana. E' stata utilizzata l'equazione del teorema dei coseni in un triangolo sferico rettangolo.

Referenze C. Sigismondi, [Gerbertus 14, 240](#) (2021) SCO SGR; [Gerbertus 14, 123](#) (2021) TAU; [Gerbertus 14, 240](#) (2021) GEM <https://www.neoprogrammics.com/sidereal-time-calculator/index.php> con $\Delta T=0$.

Copernico e Gregorio XIII

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(*ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma*)

Submitted February 19th 2023, revised and accepted February 24th

Abstract The 550th anniversary of the birth of Copernicus is celebrated with the classical measure of the ingress in Pisces in topocentrical style at the roman historical meridian lines. The 441st anniversary of the Gregorian Reformation completes this issue of classical positional astronomy.

Sommario 550° di Copernico e 441° della Riforma Gregoriana del Calendario sono celebrati in un articolo col denominatore commune dell'astronomia di posizione topocentrica alle meridiane storiche romane, studiando i dati dell'ingresso del Sole nei Pesci del 2023.

Keywords: Copernicus, Gregory XIII, Meridian line, Rome, Positional Astronomy, Zodiacial signs.

Introduzione: Il 19 febbraio 2023 ricorre il 550° anniversario della nascita di Copernico. L'astronomo polacco che ha dato il nome, suo malgrado, alla Rivoluzione Scientifica.



Fig. 1 Copernico a colloquio con Dio (Jan Matejko, 1873)

Il libro che vide la stampa nel 1543, anno della sua morte, si intitola “*De Revolutionibus Orbium Coelestium*” ossia “Sulle rotazioni delle sfere celesti”. La parola tecnica *Rivoluzione* prese significati nettamente più ampi di quanto l'autore intendesse, nel corso dei secoli successivi, soprattutto dopo l'Illuminismo e la Rivoluzione Francese. Il *cambio di paradigma*

che Copernico proponeva era un cambio di sistema di riferimento, conservando sfere e centri vuoti, tipici già del sistema Tolemaico, con un guadagno in semplicità da 78 a 54 sfere, che sarebbe sfuggito alla stragrande maggioranza dei lettori “non matematici”. Nella dedica a Paolo III, nella parte forse non interpolata da Andreas Osiander, resta la frase “mathemata mathematici scribuntur” ancora oggi valida per rammentare che il vero contenuto di quel testo è di Storia Naturale, piuttosto che di Filosofia. Comunque Copernico è uno dei grandissimi geni che ha avuto l’Umanità.

L’oroscopo di Copernico e il Sole nei Pesci 2023

Nato il 19 febbraio, 109 anni prima della riforma del Calendario, ci si può chiedere in che segno zodiacale fosse il Sole alla sua nascita. La domanda sembra, di per sé, fuori dal campo della Scienza, invece ci aiuta a comprendere come e perché Gregorio XIII ha attuato una vera e propria riforma, che anche le pietre gridavano, *resettando* il calendario di 10 giorni. Gli astronomi (Ruggero Bacone, Cusano, Regiomontano, autori arabi, Dante *Ma prima che gennaio tutto si sverni / per la centesima ch’è là già negletta Par XXVII 142-143...*) sapevano perfettamente che l’equinozio astronomico non coincideva più col 21 marzo equinozio ecclesiastico, a partire dal quale si doveva computare la Pasqua, secondo i dettami del Concilio di Nicea del 325.

Non era una conoscenza da iniziati, era un dato astronomico noto a tutti gli addetti ai lavori “mathemata mathematici scribuntur”. Ma come?

Bastava misurare l’altezza meridiana del Sole per accorgersi che l’angolo complementare alla latitudine veniva superato già l’11 di marzo, il 12 all’epoca della nascita di Copernico. Oppure che il solstizio invernale capitava il 13 dicembre alla nascita di Cusano, come recita il proverbio *Santa Lucia, il giorno più corto che ci sia.*

Tutti sapevano che alla lunga l'equinozio sarebbe arretrato ancora di più, rendendo il risultato del Computo Pasquale anacronistico. E Copernico era del segno dei Pesci.

Tra tutte le cose più gravi che dobbiamo considerare nel nostro governo, anche quella del Calendario civile deve essere risolta, decretiamo pertanto, seguendo l'avviso dei migliori matematici che d'ora in avanti siano eliminati i giorni bisestili negli anni secolari non divisibili per quattrocento. Quest'anno inoltre alla data del 4 ottobre, festa di S. Francesco d'Assisi, segua quella del 15 ottobre, e i contratti onerosi vengano pagati per tutti i giorni cancellati dal calendario. Dato in Frascati il giorno 24 febbraio 1582. Gregorio Servo dei Servi di Dio. Questo riassume il senso della Bolla "Inter Gravissimas".



Fig. 2 Gregorio XIII (tomba in s. Pietro) e Giulio Cesare (Musei Vaticani), gli autori delle ultime riforme del calendario civile. Giulio Cesare introduceva il giorno bisestile ogni quattro anni; questo era inserito proprio al 24 febbraio, **due volte=bis sextus=sesto prima delle calende di Febbraio**, cioè la fine, il 1° marzo. L'antico anno romano, quello del calendario di Numa Pompilio, terminava il 23 febbraio, e questa tradizione era ripresa dalla scelta di intercalare un giorno in quella data.

La Rivoluzione di Gregorio XIII

L'equinozio viene rimesso al suo posto, il 21 marzo. E con l'eliminazione di 3 giorni bisestili su 4 secoli si pone fine alla causa della discrepanza tra Calendario civile (di Giulio Cesare) e astronomia (durata reale dell'anno tropico).

Il calendario di Giulio Cesare era basato su una durata di $365\frac{1}{4}$ giorni, mentre la reale durata dell'anno tropico risultava leggermente inferiore di quasi 11 minuti, che diventavano un giorno intero, 1440 minuti, ogni 120 anni, tre giorni in 360 anni, da cui l'algoritmo proposto da Luigi Lilio di Cirò Marina, e portato avanti dai padri Clavio e Danti nella Commissione del Calendario creata dal papa Gregorio XIII.

Col reset di 10 giorni ci si riportava alle date di equinozi e solstizi del 325. A questo punto occorre ritornare su un concetto, quella della *Precessione degli Equinozi*, scoperto da Ipparco nel secondo secolo avanti Cristo, che è differente dalla durata dell'anno tropico. Il Sole nella sua orbita annuale attorno a noi (in senso relativo, si intende) nel cielo verso Est, ritorna al punto equinoziale che si muove di 50" verso Ovest ogni anno. Così se il Sole ha un periodo di rivoluzione siderale (medio) di 365.256 giorni, rispetto ad una stella fissa, l'anno tropico dura 1/100 di giorno di meno, per dirla con Dante "la centesima parte negletta", fino a Gregorio XIII.

Possiamo dire che la precessione degli equinozi accorcia l'anno tropico rispetto all'anno sidereo, ma non che la Riforma Gregoriana fosse dovuta alla precessione. Infatti la Riforma va a correggere la durata approssimata dell'anno tropico che era usata nell'anno di Giulio Cesare, proprio di quella parte centesima che occorreva. E la durata dell'anno tropico di Giulio Cesare era, probabilmente, la migliore approssimazione disponibile all'epoca, con numeri interi e semplici.

Stylo Gregoriano e Stile Antico per oltre un secolo è rimasta in uso la convenzione di scrivere le date nello stile precedente

alla Riforma Gregoriana insieme al nuovo stile. Per esempio in Inghilterra la data dell'eclissi totale osservata da Halley il 22 aprile 1715 corrispondeva al 3 maggio 1715 Gregoriano. Prima della riforma, in teoria, si potrebbe fare lo stesso e trovare, ad esempio, che Copernico sarebbe nato il 1° marzo 1473 Stylo Gregoriano. A cosa ci serve questa leziosità? A conoscere la fase dell'orbita del Sole. Infatti nello stile Gregoriano l'equinozio cade il 20-21 marzo in uno spazio di 4 secoli, con qualche eccezione al 19, quindi il 1° marzo mancano 20 giorni all'equinozio, e la longitudine del Sole è 10° nei Pesci, ossia 340° di longitudine eclittica, visto che il segno dei Pesci è l'ultimo settore di orbita solare di 30° prima dell'equinozio di Primavera, che costituisce lo zero delle longitudini eclittiche.

Che questo zero sia mobile rispetto alle stelle fisse era noto da Ipparco, e sarebbe stato osservabile solo durante le eclissi totali di Sole, potendo vedere le stelle dietro, oppure **cronometrando la differenza tra i passaggi del Sole e di una stella fissa in meridiano**. Questa procedura era ben nota agli astronomi, e Francesco Bianchini nel 1700 costruisce la grande Meridiana Clementina a s. Maria degli Angeli, abilitandola all'osservazione -anche simultanea- sia del Sole che delle stelle. È documentato che delle 22 stelle rappresentate sulla meridiana, Sirio sia stata utilizzata correntemente dal Bianchini, anche di giorno, le altre sono praticamente decorative.

Per questa ragione, in occasione dell'ingresso del Sole in Pesci del 2023 ho voluto ripetere l'osservazione meridiana di Sirio, alla meridiana di piazza San Pietro, la sera del 18 febbraio 2023 alle 21:01:35 all'altezza dello Scorpione, 29 secondi in anticipo sul passaggio meridiano vero, ma proprio come era stato verificato con i passaggio meridiani del Sole allo Scorpione.

La trigonometria sferica ci permette di calcolare la longitudine del Sole conoscendo i tempi di transito al meridiano il 18 e 19

febbraio e quello di Sirio la notte tra il 18 e 19 febbraio, e le coordinate eclittiche di Sirio.

Tornando all'oroscopo di Copernico, lui era nato col Sole a $\lambda=340^\circ$, tecnicamente Pesci.

La precessione degli equinozi, già al tempo di Tolomeo, aveva portato l'equinozio di Primavera davanti alla costellazione (termine diverso da segno) dei Pesci. Oggi l'equinozio sta entrando in Acquario, anche se nel 2023 sarà ancora nella costellazione dei Pesci come ridefinita nei confini celesti l'anno 1926 dalla Unione Astronomica Internazionale.

I segni zodiacali sono delle convenzioni antiche di chiamare Pesci ciò che ha longitudine eclittica da 330° fino a 360° e così via. Come per la rosa dei venti si chiama grecale il vento che viene da 45° di azimut, Nord-Est, anche se là non c'è la Grecia.

Interpolazione lineare sulle posizioni del Sole, senza stelle

La meridiana Clementina a s. Maria degli Angeli ha i riquadri dei segni zodiacali collocati nelle posizioni calcolate per il 1701. Le misure seguenti sono quelle del centro del Sole riferite alla posizione del numero 160 sulla linea meridiana.

Data	distanza[mm]da 160	Istante
18 febbraio 2023	5036	12:24:12
Pesci 1701 e 2023	5198 e 5214	18/2 23:33-19/2 00:38
19 febbraio 2023	5385	12:24:05

Il centro del Sole avrebbe toccato 5198 mm alle 23:33 del 18 febbraio, in eccellente accordo con le effemeridi geocentriche.

In realtà i Pesci nel 2023 sono di 1' più vicini all'equatore, ossia 16 mm più a Nord, cioè a 5214 mm dal numero 160, a causa della variazione secolare dell'obliquità dell'eclittica.

La differenza di un'ora con le effemeridi si può ben attribuire all'opera dell'artista che ha fatto le tarsie marmoree nel 1701, senza cercare un motivo tecnico nel dato topocentrico, da cui il Sole appare 7.4" sotto l'eclittica, che danno ulteriori 2 minuti di ritardo nell'ingresso nel segno zodiacale.



Fig. 3 Il Sole sul riquadro dei Pesci il 18 febbraio 2023 (SMA).

La longitudine eclittica calcolata con il transito di Sirio

L'ingresso in un segno zodiacale era il risultato di un calcolo.

La tabella seguente dà i transiti meridiani all'Obelisco di piazza s. Pietro, confrontati con le longitudini eclittiche vere.

data 2023	Istante transito	Longitudine 2023
Sole 18 febbraio	12:23:49	329°31'45.6"
Sirio 18 febbraio	21:01:35	104° 23' 51.1"
Sole 19 febbraio	12:23:43	330°32'18.5"

Interpolando l'istante in cui le longitudini valgono $330^{\circ} 00'00''$ si ottiene l'ingresso nei Pesci. Lo scopo dei calcoli di trigonometria sferica è ottenere le longitudini del Sole a partire da quella nota di Sirio, intesa come riferimento fisso.

Tanto Sirio quanto il Sole vengono osservati nello stesso punto della meridiana di piazza s. Pietro, per cui l'errore di allineamento con il Nord è circa lo stesso, è sistematico.



Fig. 4 Sirio si avvicina al meridiano di piazza san Pietro il 18/2. L'istante del transito meridiano anche è quasi esattamente intervallato da 24 ore, essendo stato l'11 febbraio il punto stazionario dell'equazione del tempo. Interpolando le due longitudini a 330° (ingresso nei Pesci) si hanno le 23:47 del 18 febbraio, usando le coordinate al geocentro avremmo 23:45, comunque 11 minuti dopo le effemeridi NASA 23:34 del 18/2.

Conclusioni Il testo *De Revolutionibus* di Copernico ha preceduto di 40 anni la riforma del Calendario di Gregorio XIII, che ha rimesso l'equinozio astronomico vicino al 21 marzo, migliorando l'approssimazione usata da Giulio Cesare per l'anno tropico. La Commissione del Calendario restò in vigore ancora con Clemente XI e Bianchini, creando allo scopo proprio la meridiana Clementina, vi lavorò assiduamente.

Referenze transito SMA 18/2 <https://youtu.be/N5283ov9D9o>
<https://youtu.be/Maiojbl3oTE> meridiana S. Pietro Obelisco
<https://youtu.be/mQPbeULS9qQ> transito di Sirio il 18/2 SPO
<https://youtu.be/GplFPBBpnFI> transito solareSMA 19/2
http://dpgi.unina.it/giudice/calendar/Inter_Gravissimas.html
https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomer_Copernicus,_or_Conversations_with_God C. Sigismondi, Gerbertus 19, 1-6 (2023).

I segreti di Encelado

Massimo Ciafrei

massimociafrei425@gmail.com

(ITIS G. Ferraris, Roma)

Abstract Enceladus, one of Saturn's satellites, was discovered by Frederick William Herschel in 1789. Subsequently, Voyager 1 and Voyager 2 missions revealed that Enceladus' surface is characterized by youth and a paucity of craters, indicative of recent geological activity. Furthermore, these missions have documented anomalous features on the surface, suggesting the presence of liquid water. The Cassini-Huygens mission, launched in 1997 by NASA and ESA, confirmed the existence of geysers, implying a subsurface ocean beneath the icy crust. In addition, Cassini detected a dense atmosphere surrounding Enceladus, likely driven by its geologic activity. Collectively, the Voyager II and Cassini missions have provided pivotal insights into the geology, atmosphere, and dynamics of Enceladus, greatly advancing our understanding of this Saturnian satellite.

Sommario Evidenze per l'oceano sotto la superficie di Encelado vengono discusse, presentando uno degli oggetti più interessanti del sistema solare.

Keywords Enceladus, Voyager II, Cassini spacecraft, geyser, ice.

Nome: Encelado ¹è una delle lune di Saturno, prende il nome dalla mitologia greca. Il nome, insieme a quelli delle altre sette lune conosciute all'epoca, fu proposto da John Herschel, figlio di William Herschel, che nel 1847 pubblicò i risultati delle sue osservazioni astronomiche. La scelta del nome si basa sul fatto che Saturno, noto come Crono nella mitologia greca, era il re dei Titani. Encelado fu scoperto da Fredrick William Herschel il 28 agosto 1789, col suo telescopio da 1.2 metri, che all'epoca era il più grande al Mondo. Herschel aveva osservato per la prima volta il satellite nel 1787, quando gli anelli di Saturno erano in una posizione di "taglio" rispetto alla Terra.

Voyager I e II e Cassini:² Le missioni Voyager I e Voyager II sono state lanciate rispettivamente nel 1977 e nel 1981 dalla NASA per esplorare i pianeti esterni del sistema solare. Entrambe le sonde hanno effettuato flyby di Saturno e hanno fornito informazioni importanti sui suoi anelli, i suoi satelliti e il suo sistema magnetico. In particolare, le immagini scattate da Voyager II hanno mostrato che Encelado ha una superficie

¹ [https://it.wikipedia.org/wiki/Encelado_\(astronomia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Encelado_(astronomia))

² https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/media/cassini-031605.html

molto giovane e priva di crateri, indicando attività geologica recente. Questo è stato confermato dalla scoperta di una serie di grandi vulcani attivi, conosciuti come "paleovulcani", che sono stati attivi per milioni di anni. I paleovulcani su Encelado sono vulcani che sono stati attivi in passato ma non lo sono più al momento attuale. Le immagini scattate dalle sonde hanno mostrato un gran numero di questi vulcani, alcuni dei quali hanno un diametro di fino a 50 km e un'altezza di fino a 2 km. Si ritiene che questi vulcani siano stati attivi per milioni di anni e che abbiano eruttato materiali come ghiaccio e acqua liquida. Le immagini scattate dalle sonde hanno anche mostrato la presenza di una serie di strutture uniche sulla superficie di Encelado, come le "fossette", che sono depressioni circolari che sembrano essere state scavate dall'acqua calda e dai gas sotterranei. Queste strutture suggeriscono che Encelado potrebbe avere un'attività geologica attuale, e che potrebbe essere uno dei pochi corpi celesti del sistema solare in cui è presente acqua liquida.

In generale, le missioni Voyager hanno fornito una quantità significativa di informazioni sulla geologia, geochimica, atmosfera e dinamica di Encelado, e hanno aumentato enormemente la comprensione di questa luna di Saturno. Anche se le sonde Voyager non erano specificamente progettate per studiare Encelado, ne hanno comunque fornito informazioni fondamentali, e hanno creato una base per ulteriori studi.

Ulteriori studi ripresi dalla sonda Cassini-Huygens, lanciata nel 1997 dalla NASA e dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA), che ha fornito ulteriori informazioni sulla luna di Saturno Encelado. La sonda orbitale Cassini ha effettuato numerose osservazioni ravvicinate di questa luna durante la sua missione di 13 anni intorno a Saturno, fornendo immagini ad alta risoluzione e misurazioni scientifiche dettagliate. Una delle scoperte più importanti fatte da Cassini riguarda la presenza di geyser su Encelado. Le immagini scattate dalla sonda hanno mostrato getti di vapore d'acqua che si innalzano fino a 500 km

dalla superficie, il che suggerisce la presenza di un oceano sotterraneo caldo e salato sotto la crosta di ghiaccio di Encelado. Cassini ha anche scoperto la presenza di un'atmosfera densa e attiva intorno a Encelado. La sonda ha misurato la presenza di azoto, metano e anidride carbonica nell'atmosfera, il che indica una fonte di rifornimento continuo di questi gas, probabilmente a causa dell'attività geologica sotterranea e dei geyser.

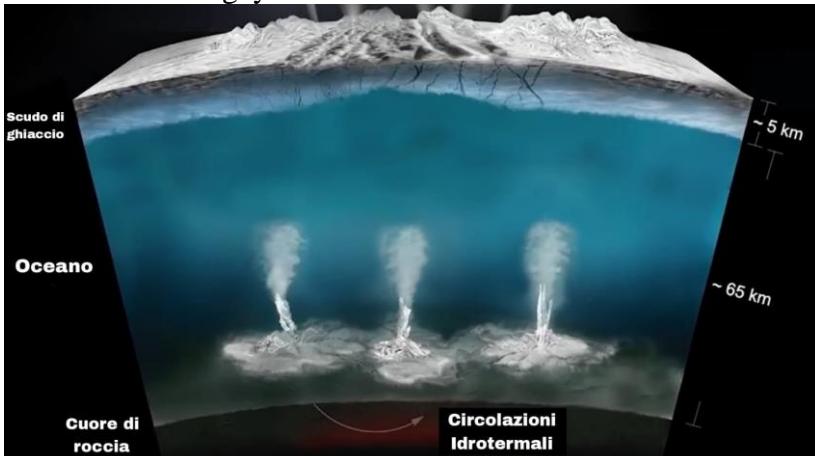


Fig. 1 Geyser sulla superficie di Encelado. Schema tradotto da Enceladus Hydrothermal Activity And Geysers is a photograph by Nasa/jpl-caltech/southwest Research Institute/science Photo Library.

Inoltre, la sonda Cassini ha fornito informazioni dettagliate sulla geologia di Encelado, mostrando una grande varietà di feature come crateri, fosse, e depositi di ghiaccio e anche una serie di strutture simili a quelle viste dalle sonde Voyager chiamate "fossette", che sono state create da attività geologica passata. In generale, la missione Cassini-Huygens ha fornito una quantità significativa di informazioni su Encelado, confermando e completando molte delle scoperte fatte dalle missioni Voyager e aumentando ulteriormente la comprensione di questa luna di Saturno.

Orbita:³ Encelado è uno dei principali satelliti interni di Saturno, il quattordicesimo in ordine di distanza dal pianeta. La sua orbita è all'interno dell'anello E, il più esterno di Saturno, a una distanza di 238000 km dal centro di Saturno e 180000 km dal confine dell'atmosfera. La sua orbita richiede 32.9 ore per completarsi. La risonanza orbitale tra Encelado e Dione è di 2:1, cioè Encelado effettua due orbite per ogni orbita effettuata da Dione. Questa risonanza mantiene l'eccentricità orbitale di Encelado a 0.0047 (praticamente circolare) e fornisce l'energia (mareale) per l'attività geologica. Come molti dei satelliti maggiori di Saturno, Encelado ha una rotazione sincrona con il periodo orbitale, mantenendo sempre la stessa faccia rivolta verso Saturno. A differenza della Luna, non sembra che Encelado abbia un movimento di librazione attorno al suo asse di rotazione, tuttavia, analisi della forma del corpo suggeriscono che potrebbe aver avuto una librazione forzata in passato, che potrebbe essere stata un'ulteriore fonte di energia.

Criovulcanismo: I dati della sonda Cassini hanno confermato nel 2005 la presenza di criovulcanismo su Encelado, in cui i materiali eruttati sono acqua e altri elementi volatili, invece di magma. Le immagini della sonda hanno mostrato un pennacchio di particelle ghiacciate dal polo Sud del satellite, accompagnato da un'atmosfera di vapore acqueo. Gli strumenti della sonda, come il magnetometro e lo spettrografo a ultravioletti, hanno confermato questi dati, e la sonda è anche riuscita a volare attraverso una nube di gas durante un sorvolo, permettendo un'analisi diretta delle particelle attraverso gli strumenti INMS e CDA. Le analisi hanno mostrato che la maggior parte dei gas erano vapore acqueo, e che la nube di gas era in realtà un pennacchio criovulcanico proveniente dalla regione polare Sud.

³<https://web.archive.org/web/20060928230642/http://saturn.jpl.nasa.gov/multimedia/products/product-presentations.cfm>



Fig. 2 I geyser di Encelado e la sonda Cassini. (credit NASA)

Struttura interna:⁴ La missione Cassini-Huygens ha fornito informazioni sulla struttura interna di Encelado, tra cui la densità di 1.61 g/cm^3 , superiore a quella delle altre lune ghiacciate di Saturno, indicando una maggiore percentuale di silicati e ferro. Si ipotizza che l'interno del satellite sia stato riscaldato dal decadimento degli elementi radioattivi e che possieda un mantello ghiacciato e un nucleo planetario roccioso. Le attività geologiche attuali potrebbero essere alimentate dal riscaldamento mareale in risonanza con Dione.

⁴ <https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/enceladus/in-depth/>

Vita extraterrestre:⁵ Encelado è stato trovato geologicamente attivo, con pennacchi di vapore acqueo che fuoriescono dalla sua superficie e si dirigono verso Saturno. La composizione dei pennacchi, che include una significativa quantità di sali di sodio, suggerisce che la loro origine sia un oceano salato sotto la superficie o almeno delle cavità contenenti acqua salata. Ciò significa che Encelado potrebbe essere in grado di supportare la vita, poiché sono stati rilevati anche componenti organici in alcuni granelli di polvere. La presenza di acqua liquida è mantenuta da una combinazione di decadimento radioattivo e riscaldamento mareale.

Meccanica delle eruzioni: I meccanismi che governano l'emissione di acqua cambiano con la profondità e l'altitudine. Nelle crepe, la densità dell'acqua aumenta di circa il 90% dalla base del ghiaccio fino alla superficie a causa della differenza tra acqua liquida e solida. Il punto di congelamento si trova nel punto triplo dell'acqua, dove esistono contemporaneamente le sue fasi liquida, solida e gassosa. Appena sopra il punto di congelamento, l'ebollizione della decompressione crea un flusso di vapore e gocce di liquido. Le gocce si congelano formando eventualmente le particelle di ghiaccio salato raccolte dalla sonda Cassini.

Graffi di tigre:⁶ Le "graffi di tigre" sono fessure lunghe circa 130 chilometri, situate nell'emisfero meridionale di Encelado. Queste fessure sono particolarmente interessanti perché sembrano rimanere aperte nonostante le temperature estremamente basse di Encelado.

La gravità di Saturno esercita una forte pressione sulle lune più grandi, tra cui Encelado. Queste forze mareali causano il riscaldamento e il raffreddamento del manto di ghiaccio di Encelado, con temperature più elevate ai poli. Quando l'acqua liquida si solidifica in ghiaccio sotto la crosta di ghiaccio

⁵https://www.researchgate.net/publication/261248112_Life_detection_with_the_Enceladus_Orbiting_Sequence

⁶https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia13620.html

esterna, si espande in volume, causando pressione sul ghiaccio fino a quando non si rompe.

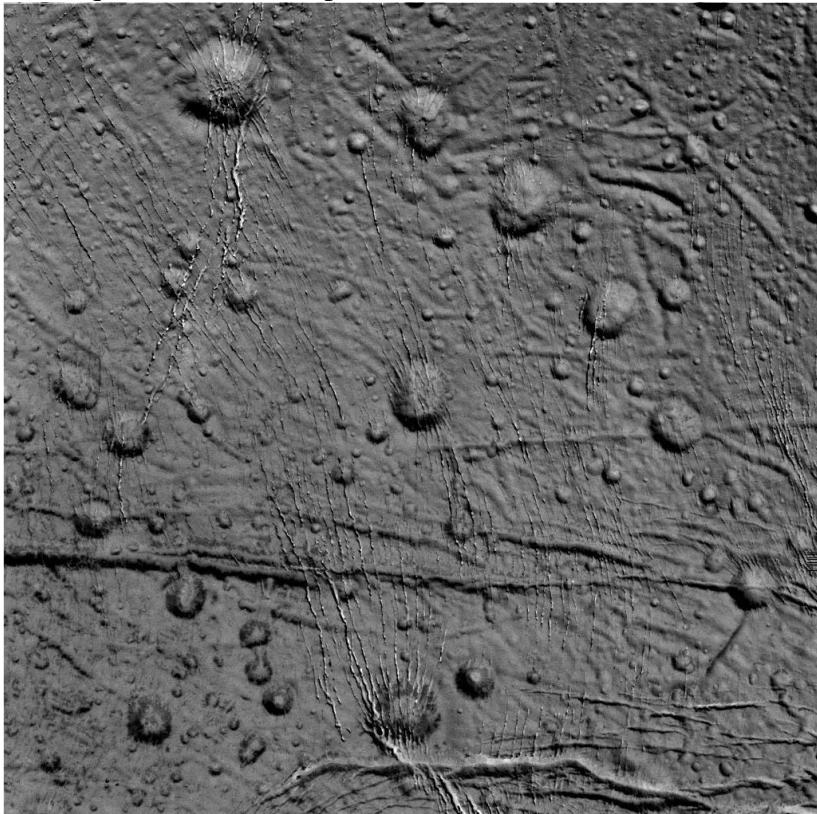


Fig. 3 Il polo Nord di Encelado: molti crateri sono tagliati da numerose linee di frattura successive alla formazione dei crateri stessi. NASA/JPL-Caltech/SSI

L'acqua che fuoriesce dalle fessure forma bordi di ghiaccio che appesantiscono la fessura e causano la creazione di una fessura parallela a circa 30 chilometri di distanza. Questo processo potrebbe impedire la formazione di nuove fessure altrove su Encelado.

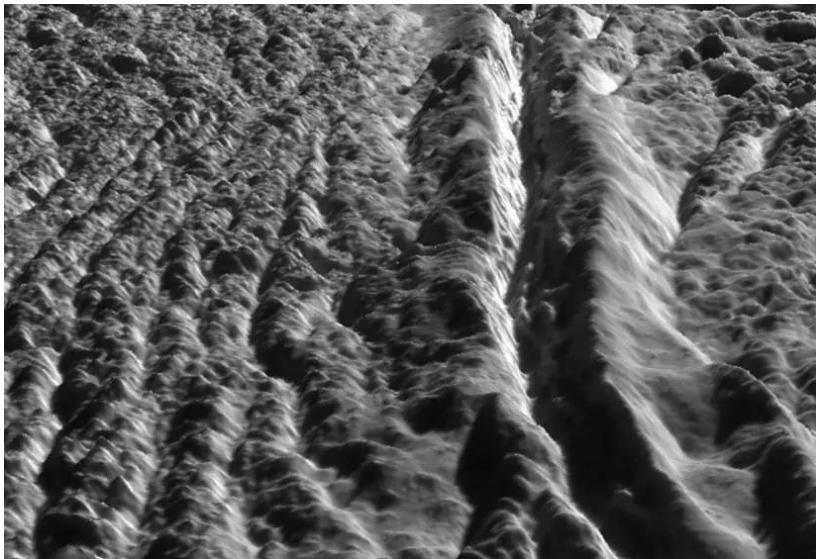


Fig. 4 Vista prospettica del **Damascus Sulcus**, uno dei cosiddetti “graffi di tigre”, generata utilizzando immagini ad alta risoluzione di Encelado acquisite nell’agosto 2008 con una risoluzione compresa tra 12 e 30 metri. Credits: NASA

Solco di Damasco:⁷ è una caratteristica sulla superficie della luna di Saturno Encelado. È una lunga trincea lineare che corre parallelamente all’equatore di Encelado e si trova nell’emisfero meridionale. Si ritiene che sia una caratteristica tettonica causata dal movimento del ghiaccio e si pensa che possa essere un possibile sito di attività geyser, poiché sono stati osservati getti di vapore acqueo e particelle di ghiaccio nei pressi. **Solco di Baghdad:** è composto da due rami con creste parallele alte fino a 100 metri e depressioni mediali profonde fino a 250 metri. È probabilmente la fonte dei getti di vapore acqueo attivi visti in questa regione, così come il **Solco del Cairo**,⁸ vicino al polo Sud di Encelado, lungo 2 km a forma di V.

⁷https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia11113.html

⁸<https://www.jpl.nasa.gov/images/pia12209-perspective-view-of-cairo-sulcus-enceladus>

Introduzione all'osservazione del Sole

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(*ICRA/UPRA e ITIS G. Ferraris, Roma*)

Abstract The observation of the Sun is possible, in white light, with a basic telescope; it opens to some astrophysical considerations about what we observe: 1. The photosphere and the granulation. 2. The sunspots and their cycles 3. The limb darkening and the faculae 4. The solar atmosphere, and the solar spectrum. Also a recap on 5. Atmospheric and Instrumental Optics is necessary to understand how we observe.

Sommario L'osservazione del Sole è possibile in luce bianca con un telescopio base, e apre a varie considerazioni astrofisiche su ciò che osserviamo: 1. Fotosfera e granulazione; 2 Macchie solari e loro cicli; 3. Oscuramento al bordo e facole; 4. Spettro e atmosfera solare; 5. Ottica atmosferica e strumentale, per capire come lo osserviamo.

Keywords Sun, white light, photosphere, solar atmosphere, solar spectrum, limb darkening, sunspots, faculae, plages, turbulence, atmospheric optics.

Introduzione L'osservazione del Sole ci apre una finestra su processi energetici che sono diretta conseguenza della fusione nucleare all'interno del nucleo. L'energia che il Sole rilascia nello spazio, quasi $4 \cdot 10^{26}$ W, può venire solo dalla trasformazione in energia E di una massa m piccola relativamente alla massa solare, $2 \cdot 10^{33}$ Kg, grazie alla famosa formula $E=mc^2$. A metà ottocento si riteneva che il Sole producesse questa energia per contrazione progressiva, ma questo processo termodinamico avrebbe implicato una "vita" di 100 milioni di anni. Le scoperte paleontologiche e geologiche di quel periodo portarono gradualmente a capire che la Terra era molto più vecchia e di conseguenza anche il Sole doveva esserlo. Allora la contrazione gravitazionale non poteva essere il modo con cui il Sole erogava la sua energia, e circa 3 decenni dopo che Einstein pubblicò la formula $E=mc^2$ (1905) si cominciò a capire come, nel suo nucleo, l'Idrogeno si trasformava in Elio rilasciando lo 0.7% della massa iniziale sotto forma di energia (luce + neutrini). Verso la fine del secolo scorso si capì anche che i neutrini cambiavano sapore attraversando la sua massa, partendo come neutrini elettronici ed arrivando a Terra sia elettronici che muonici e tauonici.

Il Sole divenne quindi il laboratorio per scoprire nuova fisica.

Trattandosi della stella a noi più vicina, di cui riusciamo a vedere tanti dettagli superficiali, è naturale che sia l'oggetto su cui tutte le teorie fisiche sulle stelle possono essere provate con la migliore precisione possibile.

La teoria della Relatività, la Fusione nucleare e l'Oscillazione dei neutrini sono le tre grandi teorie a cui lo studio del Sole ha dato importanti e cruciali contributi, e tante altre vedono nel Sole il loro campo di prova. Non a caso in questi anni si stanno sviluppando strumenti sempre più sofisticati da Terra e da satellite per studiare il Sole. Alcuni esempi: il telescopio solare europeo EST in corso di sviluppo alle Canarie, il telescopio solare Americano da 4m Inohue alle Hawaii, la sonda NASA-ESA Solar Orbiter, e la sonda NASA Parker Solar Probe, che stanno entrambe avvicinandosi al Sole più di ogni altra. Dietro questi strumenti ci sono Europa e Stati Uniti, e ingenti investimenti, dai quali ci attendiamo tantissima nuova fisica da capire e scoprire e lavoro per le prossime generazioni di scienziati. Se i telescopi con cui oggi noi osserviamo il Sole non raggiungono la potenza degli strumenti di queste joint-ventures internazionali, abbiamo capitalizzato quattro secoli di conoscenze sul Sole e sul suo comportamento che, se sono niente rispetto ai suoi 5 miliardi di anni di età, ci permettono di capire molto meglio di un secolo e mezzo fa quello che vediamo. Di seguito cercheremo di dare delle indicazioni semplici senza trascurare il contenuto fisico e astrofisico che sta dietro le immagini che possiamo cogliere e anche fotografare ponendo direttamente all'oculare la fotocamera.

1. La fotosfera e la granulazione Fotosfera significa “sfera di luce” ed è effettivamente una sfera entro qualche parte su un milione. Significa che su un milione e mezzo di chilometri di diametro, muovendoci dal polo all'equatore solare, il diametro non cambia più di 8 km, ed è più largo all'equatore per effetto della rotazione del Sole su se stesso in circa 25 giorni. È molto difficile misurare variazioni del diametro solare che non siano quelle apparenti dovute all'avvicinamento e allontanamento orbitale della Terra, perché si tratta di una misura che richiede

una precisione elevatissima anche nella definizione dell'oggetto da misurare che, di fatto, è una sfera di plasma (elettroni e protoni liberi in equilibrio con atomi di idrogeno) e non un oggetto solido. Il tutto deve essere misurato meglio di 1 parte su 1 milione. Già conoscere la larghezza di un banco con la precisione di 1 micron costituirebbe un problema complesso in laboratorio, figuriamoci il Sole che viene osservato attraverso l'atmosfera turbolenta della Terra, che lo deforma anche per rifrazione. La superficie del Sole appare rugosa, come la buccia di un'arancia, e la struttura fine ci mostra la **granulazione** a varie scale: da 1", cioè circa un millesimo del raggio solare, fino a 10 volte questo valore. Si tratta delle teste delle **colonne convettive**, che trasportano continuamente materia calda dalle profondità del Sole fino in superficie, e ritorno. La convezione è un processo che avviene in una pentola d'acqua sul fuoco: l'acqua si scalda in basso e sale verso l'alto, trasportando il calore verso la superficie. Questo modo di trasporto del calore è molto efficiente, però non avviene sempre: se nell'acqua mettiamo la farina di mais per fare la polenta, questa inibisce la convezione. Allora il calore si accumula senza andare su e –se non si mischia- la polenta si brucia. La struttura del Sole non è tutta convettiva: sotto il 70% del raggio solare non si muove nulla, e il calore proveniente dal nucleo si propaga per radiazione. La densità all'interno del Sole è talmente elevata che un fotone, viaggiano sempre alla velocità della luce, impiega un milione di anni a fare un milione di chilometri a causa dei continui urti con gli elettroni e i protoni della materia dentro al Sole. Nel nucleo la temperatura è di 15 milioni di gradi e la densità tale che può avvenire la fusione nucleare di quattro protoni in un nucleo di Elio, con il rilascio dell'energia sotto forma di fotoni e neutrini. Mentre i fotoni impiegano un milione di anni ad uscire, i neutrini elettronici ci mettono 2.3 secondi e dopo 8 minuti arrivano sulla Terra, ma 2/3 di loro cambiano sapore. Per osservare i neutrini ci sono i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, fiore all'occhiello della Fisica Italiana.

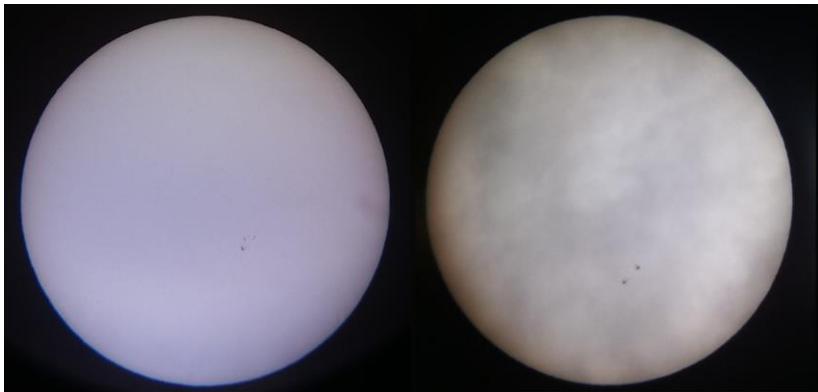


Fig. 1 Sole il 3 e 4 aprile 2023 ore 9 e 8 UT. Maksutov 70/1250
Si nota l'effetto della rotazione solare sul gruppo di macchie, ma anche lo spostamento relativo tra di esse in 23 ore.

2. Le macchie solari e i loro cicli

Dopo lunghi periodi di Sole *blank* senza macchie (2009-2011 e 2020-2022), che hanno riportato alla memoria i grandi minimi passati, che prendono il nome dagli scienziati che li hanno scoperti o notati, come il minimo di Maunder (1645-1715) scoperto da Walter Maunder e Signora ai primi del novecento, il minimo di Dalton (1798-1833)¹ e altri cicli più antichi (Spörer 1450-1540; Oort 1010-1050)², sono tornate le macchie sulla superficie del Sole e i numeri di Wolf sopra il 100.

L'attività solare dal 1750 viene monitorata contando i gruppi di macchie G ed il numero totale di macchie e macchioline N.

Il **numero di Wolf** è **R=10G+N** e lo possiamo facilmente calcolare osservando al telescopio. Equazioni personali e risoluzione del telescopio servono per produrre dati scientifici, che comunque sono pubblicati dalla Specola Solare di Locarno.³ È bene imparare ad osservare bene l'attività solare.

¹ The Dalton Minimum is a period of relatively low solar activity from 1798 – 1833, which has been named after John Dalton, who noticed a significant reduction of the auroral frequency during this time (Silverman and Hayakawa, 2021), citazione da Clette et al. (2023)

² https://en.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%B6rer_Minimum cit J.Eddy (1976)

³ [Disegni – Home page della Specola Solare](#)

Se conosciamo il numero di Wolf dal 1750 e il numero di aurore dal Medioevo attorno al 1000 possiamo stimare eventuali periodicità fino a 1000 anni. Con le analisi dei *proxies* dell'attività solare, come il contenuto di Carbonio 14 nell'atmosfera intrappolata nelle carote di ghiaccio in Groenlandia e in Antartide, si può risalire ad alcuni millenni or sono e ipotizzare cicli solari più lunghi. Si tratta comunque di periodi di campionamento che sono ancora un milione di volte più corti della vita del Sole. Ci potrebbe venire in aiuto l'osservazione di tante stelle simili al Sole, ma i dettagli superficiali che possiamo scorgere con gli strumenti più avanzati non arrivano a competere con quelli che sul Sole possiamo vedere con un cannocchialino da banco.

Abbiamo accennato al numero dei gruppi G, ma non come si fa a capire –da una sola occhiata– se delle macchie sono appartenenti ad un gruppo o fanno gruppo a sé. In realtà ci vuole un'esperienza ben più lunga, ed un'osservazione continua per capire se le macchie appartengono ad un gruppo, avendone seguita la loro evoluzione precedente o apparizione improvvisa sulla superficie del Sole, da un giorno all'altro.

Possiamo sempre riferirci a Locarno o alla NASA.⁴

Resta molto interessante osservare come nello spazio di un'ora la geometria di una macchia può variare e anche quella delle macchie l'una rispetto all'altra. È facile vedere sparire i **pori** più piccoli, che appaiono già privi di **penombra**.

Ombra e penombra di una macchia non hanno nulla a che vedere con l'oscuramento parziale o totale, ma sono delle zone, evidenti, che corrispondono a temperature più basse della fotosfera, che è a 6000 °C. Le macchie sono a circa 4000 °C.⁵

G. E. Hale scoprì ai primi del novecento che alle macchie sono associati campi magnetici anche di 2000-3000 Gauss, che “costringono” il plasma che è carico a non passare per le macchie. La scoperta è stata fatta con lo spettroscopio,

⁴ Es. il gruppo in fig. 1 è il #[13270](#)

⁵ <http://www.icra.it/solar/macchia.jpg> ; <http://www.icra.it/solar/tmacchia.jpg>

sfruttando l'effetto Zeeman per cui una riga spettrale si divide in tre quando c'è campo magnetico. Prima di Hale il magnetismo solare era noto solo per le tempeste geomagnetiche che investivano la Terra facendo "impazzire" le bussole, ma sono legate ad espulsioni di massa coronale (protoni) a loro volta collegate ad attività superficiali (flares) in corrispondenza delle macchie stesse. Padre Angelo Secchi a Roma era stato tra i primi ad installare un osservatorio geomagnetico al Collegio Romano e rivelò gli effetti della tempesta di Carrington dei primi di settembre del 1859.



Fig.2 Regione attiva AR 13270 il 5 aprile 2023 Newton 25/f4.

Una **regola pratica: il Sole ruota verso Ovest**, quindi le macchie di lunga durata "tramontano" al lembo che precede e "sorgono" da quello che segue, questo si può apprezzare quando si osserva da strumenti fissi come il telescopio senza motore o la meridiana di s. Maria degli Angeli. Durante un periodo di massimo di attività solare si nota, dopo qualche giorno di osservazione, che le macchie sono disposte su due fasce che sono nell'emisfero Nord e Sud del Sole, che partono da 40° N o S e si avvicinano all'equatore. Ciò dà luogo al diagramma a farfalla delle latitudini delle macchie dopo un ciclo di 11 anni, che si completa in polarità N-S dopo 22 anni.

Una **regola pratica: il Sole ruota verso Ovest**, quindi le macchie di lunga durata "tramontano" al lembo che precede e "sorgono" da quello che segue, questo si può apprezzare quando si osserva da strumenti fissi come il telescopio senza motore o la meridiana di s. Maria degli Angeli. Durante un periodo di massimo di attività solare si nota, dopo qualche giorno di osservazione, che le macchie sono disposte su due fasce che sono nell'emisfero Nord e Sud del Sole, che partono

da 40° N o S e si avvicinano all'equatore. Ciò dà luogo al diagramma a farfalla delle latitudini delle macchie dopo un ciclo di 11 anni, che si completa in polarità Nord Sud dopo 22 anni.

3. L'oscuramento al bordo e le facole

La luminosità del Sole al bordo è minore del centro e la sua crescita passa da un 16% al lembo al 100% al centro.

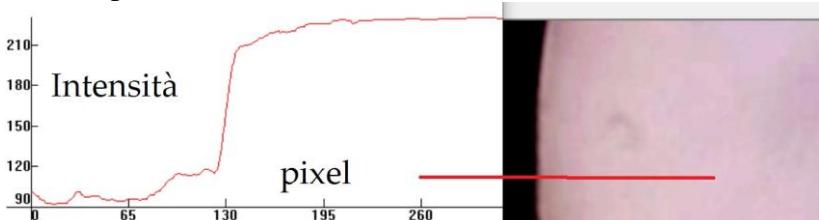
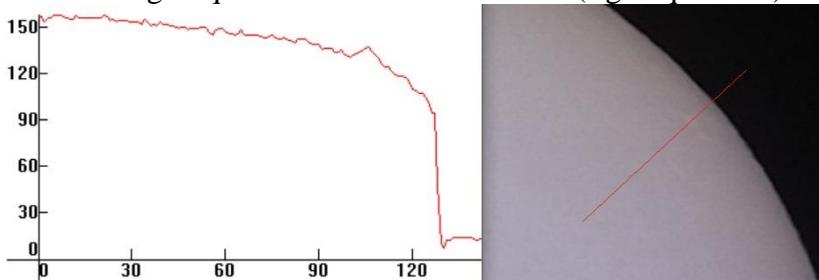


Fig. 3 e 4 Intensità ripresa sulla “coupe” rossa al lembo solare. Le *facole* sono invece zone più chiare della fotosfera, che si vedono meglio quando sono vicine al bordo (fig. 4 qui sotto).



La *facola* in fig. 4 ha un'intensità di 137 rispetto alla fotosfera che lì vale 124. L'intensità misurata dalla camera dello smartphone dipende dalla sensibilità dello strumento alle varie lunghezze d'onda. Nel blu e nel rosso la sua sensibilità è circa la metà che nel verde, quindi potremmo correggere il dato misurato a 150 vs 124. Estraendo la radice quarta⁶ di questo rapporto troviamo il rapporto tra le temperature, da moltiplicare per la temperatura della fotosfera, e viene circa 6030°K per questa *facola*, in buon accordo con Kononovic.⁷ L'effetto raffreddante lo fa sia il nostro rivelatore, sia

⁶ Uso la legge di Stefan-Boltzmann per cui l'emissività è proporzionale a T^4

⁷ Kononovic et al, (1985) [1986SvAL...12..164K \(harvard.edu\)](http://1986SvAL...12..164K (harvard.edu))

l'atmosfera solare, che è responsabile del *limb darkening*, dell'oscuramento al lembo. Donald H. Menzel ha spiegato bene a cosa è dovuto il Limb Darkening: non si tratta di un affievolimento “di tipo terrestre” ossia come accade all'orizzonte al tramonto quando il Sole appare più fioco perché la sua luce attraversa più atmosfera. La temperatura dell'atmosfera solare cresce via via che si scende più in basso verso la superficie e le osservazioni guardano attraverso quella parte dell'atmosfera solare che è *sotto la regione in cui i gas diventano nebbiosi*, proprio perché la loro temperatura è elevata. Di fatto osserviamo strati più vicini alla superficie guardando verso il centro del Sole e più lontani e quindi più alti verso il bordo. Quando la temperatura diminuisce la radiazione violetta si riduce maggiormente di quella rossa e perciò il bordo ci appare più rossastro e scuro.⁸

4. L'atmosfera solare e lo spettro di Fraunhofer

Nell'atmosfera solare abbonda l'idrogeno sotto le forme H, H⁺ H⁻ e H₂: ciascuna di esse è capace di assorbire i fotoni (transizioni *e⁻legato-e⁻libero*) agendo su una parte dello spettro elettromagnetico, determinando opacità sia negli infrarossi, che nel rosso, che nell'ultravioletto. La forte ionizzazione dei gas solari libera gli elettroni e loro sono i primi responsabili dell'opacità dell'atmosfera solare. Le plages, in cromosfera, corrispondono alle facole sottostanti. Esse sono meglio visibili ai bordi del Sole rispetto al centro, grazie all'effetto filtro dell'atmosfera solare. Facula in latino = piccola torcia.⁹ Con un filtro a banda stretta, come il *solar continuum*, si può calcolare il rapporto di temperature tra macchie e fotosfera, che in fig. 5 risulta in intensità 127/156 e in temperatura 5460 su 5750 °K, ma il seeing del pomeriggio e dei palazzi vicini, può trarci in inganno: infatti “lava” l'immagine spostando i fotoni da fuori a dentro la macchia, che risulta meno scura di quanto sia.

⁸ D. H. Menzel, *Il nostro Sole “Our Sun”*, Faenza Editrice, 1981, pp. 205-8.

⁹ <https://www.isf.astro.su.se/highlights/faculae-explained/>

<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/421553/pdf> Keller et al. (2004)

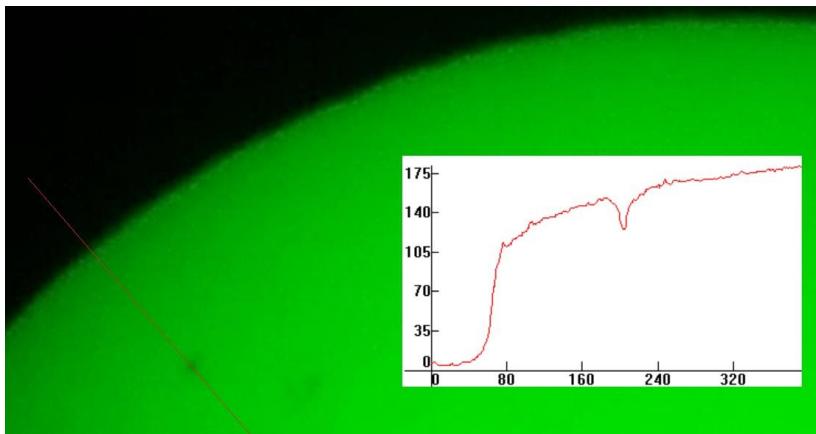


Fig. 5 AR13270 col filtro a 540 ± 10 nm *solar continuum*, N70f5

La scelta di postazioni senza ostacoli al vento (alberi sopravvento, che frangono il flusso d'aria in tante bolle davanti al telescopio, o edifici e asfalto sotto la linea di vista...) favorisce osservazioni più dettagliate, con un **seeing migliore**. Le osservazioni del Sole nella riga del Calcio selezionano solo i fotoni che vengono da transizioni energetiche caratteristiche di alte temperature, quindi il rapporto tra fotosfera e macchia dà un risultato più vicino alla realtà. Queste transizioni sono al limite corto dello spettro visibile, nel violetto, e sono poco visibili all'occhio adulto, tuttavia la bontà del seeing è fondamentale per ottenere buone misure di questo tipo, in ogni caso.

L'atmosfera solare assorbe, sempre per transizioni atomiche tra fotone ed elettrone legato, alcune radiazioni a specifica lunghezza d'onda, presentandosi come un arcobaleno solcato da molte righe nere sottili e sottilissime: sono le righe di Fraunhofer, in onore del fisico che le studiò per primo, costruendo gli spettroscopi migliori del Mondo ai primi dell'ottocento. La foto che segue è stata ottenuta in laboratorio con un reticolo di diffrazione da 200 righe/mm posto davanti al monoculo 7x18 e allo smartphone, riprendendo un cilindro metallico (gamba di sedia) a 4 m illuminato dal Sole alle spalle.

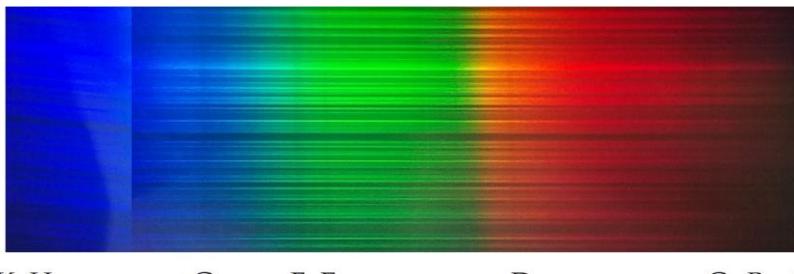


Fig. 6 Le righe (verticali) di Fraunhofer: le più a destra sono telluriche, ossia dovute all' O_2 e H_2O della nostra atmosfera.

La sensibilità del sensore dello smartphone non è di qualità astronomica, ma consente di riprenderne 7-8 bene, quelle che in letteratura sono classificate con la lettera maiuscola A, B, C, D (il Sodio nel colore giallo) E, F, G, H e K: quella del Calcio. Lo spettro solare ci rivela oltre alla temperatura della fotosfera anche le componenti assorbenti nell'atmosfera solare, che nel corso degli anni sono stati identificati in laboratorio. Le altre righe appartengono al Ferro che, sebbene sia presente in tracce minuscole, si riesce a vedere per il suo effetto assorbente netto. Lo spettro di Fraunhofer è una delle caratteristiche più spiegate dai libri e meno osservate nella realtà, sia scolastica che universitaria. Si deve ricordare che tutta l'astrofisica stellare si basa su questi spettri e la loro interpretazione.

5. Strumenti per osservare il Sole e ottica atmosferica

Sembra quasi un paradosso, ma lo strumento da conoscere meglio nell'osservazione solare è proprio l'atmosfera. Infatti il Sole non ci dà problemi di scarsezza di fotoni, perché ce ne arrivano tantissimi, ma –come per gli altri oggetti celesti, e generalmente di più, inducendo più turbolenza in atmosfera– per il modo come ci arrivano. L'energia del Sole viene assorbita dal suolo in modo diverso se è asfalto o prato, ottenendo per l'asfalto d'estate temperature anche di 50°C, mentre per il prato 25°C. L'aria sopra queste due superfici bolle e le bolle passano davanti alla linea di vista del telescopio disturbando la visione con continue sfuocature, ora qua ora là. Sono rari i momenti di quiete, e brevissimi.

Normalmente un sito per le osservazioni in città viene scelto o sopra il tetto di un edificio, o dove non ci sono ostacoli. Per il Sole andrebbe bene pure un balcone o una finestra a Sud, ma questo non è sufficiente a garantire buone osservazioni.

Già alla fine dell'ottocento si era capita l'azione calmierante dell'acqua sulla turbolenza atmosferica: l'Università di Goettingen aveva scelto Locarno, sulla riva occidentale svizzera del Lago Maggiore, per collocare la sua stazione osservativa del Sole, e poi alla fine del novecento ancora l'Isola di La Palma nelle Canarie. Anche l'Isola di Capri era stata scelta per osservare il Sole dai tedeschi, e non solo banalmente per le maggiori giornate di bel tempo, ma proprio per ragioni di **seeing**. Questa parola inglese esprime le condizioni di nitidezza dell'immagine, e le quantifica in secondi d'arco ["]. Si tratta del minimo dettaglio percepibile, e quando pensiamo a Marte che nei casi migliori ogni 18 anni diventa grande 25" capiamo che 1" di seeing significa non poter vedere dettagli più grandi di 1/25 del suo diametro, che vale 6000 km, quindi 240 km. Passiamo da seeing "antartici" di 0.2" a seeing ottimi di 1", fino a seeing urbani di 5", come riscontriamo alla meridiana di s. Maria degli Angeli.

Le bolle d'aria turbolente salgono spinte dalla differenza di temperatura: 50°C della bolla rispetto a 10-20°C dell'aria circostante. Sulla linea di vista se ne incontrano tante di dimensioni varie, ma anche se fossero tutte uguali vedremmo sia poche bolle vicine che molte lontane sempre nello stesso campo visivo. Le vicine determinano la turbolenza a grande scala angolare, mentre le lontane quella a piccola scala angolare. Facciamo un modello semplificato: bolle che si alzano a 50 cm/s, come quelle che abbiamo visto sul termosifone. La dimensione di queste bolle sembra di 1 cm.

Le bolle immediatamente vicine all'obbiettivo del telescopio, da 2.5 cm per s. Maria degli Angeli a 7 cm per un Mak con filtro solare, attraversano -col Sole a 45° d'altezza- il diametro del foro rispettivamente in 0.05 s (SMA) e 0.14 s.

Le bolle più lontane appariranno più piccole, ma

attraverseranno il diametro angolare del Sole in un tempo maggiore. Ad esempio a 5 metri di distanza il disco solare sarebbe largo 5 cm (è sempre 1/100 della distanza) e la bolla lo passa in soli 0.1 s in entrambi i casi, ma il “cono di accentanza” che include il diametro d’obbiettivo ed ha un diametro di (5+2.5) cm nel caso SMA e (5+7) cm nell’altro, viene attraversato da quella bolla in 0.15 s e 0.24 s. A 10 metri diventano 12.5 cm per SMA e 17 cm per il Mak, e la bolla attraversa questi coni in 0.25 s e in 0.34 s. A 100 metri abbiamo 102.5 e 107 cm rispettivamente e 2.0 e 2.14 s di attraversamento. Quindi le bolle più vicine influiscono sulla vibrazione dell’immagine a bassa frequenza –per SMA sono 20 Hz per il Mak circa 7 Hz- mentre ad 1 m abbiamo i contributi a 6 Hz e 4 Hz a 10 m, invece, 4 Hz e 3 Hz e così via.

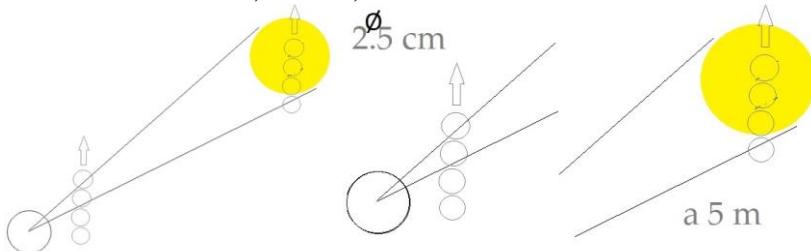


Fig. 7 Le bolle salgono alla stessa velocità, le vicine perturbano tutta l’immagine del Sole, le lontane una piccola parte a parità di tempo di osservazione e velocità delle bolle d’aria.

Questo modello semplificatissimo ci insegna che l’apertura dell’obbiettivo del telescopio conta fino a qualche metro dal telescopio, poi la turbolenza a bassa frequenza agisce in modo indipendente dal diametro di obbiettivo. Finché la bolla d’aria è grande quanto il diametro del Sole alla distanza dall’obbiettivo, quindi circa 1 metro nel caso di bolle da 1 cm, il nostro modello spiega le vibrazioni dell’immagine e la loro scala.

Se ci fossero bolle da 1 cm anche a 10000 metri di distanza avremmo 1 cm su 100 m di diametro solare, una parte su 10000 di un diametro angolare di quasi 2000”, quindi 0.2”.

La turbolenza a quelle quote del *jet stream* è –di solito–

maggiori, quindi le bolle lì sono comprese tra 5 cm (seeing 1'') e 15 cm (seeing 3''), ma questa turbolenza non dipende dal luogo di osservazione a meno di collocarsi in mezzo all'Oceano, come per le Hawaii e le Canarie, senza uragani di passaggio. Cristoforo Colombo, infatti, era in grado di prevederne uno osservando la scintillazione delle stelle più luminose.

Per le osservazioni quotidiane del Sole conta sistemare i primi metri, ed è per questo che a Locarno davanti al telescopio Gregory da 45 cm di diametro, il più grande sul suolo del continente europeo, c'è un tetto piano sbiancato al biossido di titanio, che viene coperto da uno strato di 4-5 cm d'acqua per ridurre la turbolenza locale nei primi 2 metri. Noi, nei primi metri davanti al telescopio, dovremmo avere almeno del prato.

Il professor Alessandro Cacciani (1937-2007), che lavorava all'Osservatorio Astronomico di Monte Mario negli anni sessanta, mi raccontava che il seeing alla levata del Sole era spettacolare, e la maggior parte del lavoro osservativo veniva svolto a quell'ora. Padre Secchi che osservava dal Collegio Romano aveva seeing molto buoni, e anche all'Osservatorio di Catania si parla di immagini straordinarie al mattino presto. In quelle ore la differenza di temperatura tra suolo e atmosfera non è ancora tale da scatenare la convezione e quindi la turbolenza, in altre parole l'atmosfera è ferma. Se a ciò si aggiunge l'assenza di vento e turbolenze locali generate dal vento ecco la ricetta "antartica" per un ottimo seeing.

L'influenza del vento e degli alberi o gli edifici sopravvento vanno anche considerate. Se a destra del Sole c'è un albero, più vicino è peggio è, e il vento spira da destra, il Sole si trova sottovento rispetto all'albero, e i filetti di flusso dell'aria sono rotti dal profilo dell'albero, creando bolle d'aria turbolente. Appena il vento soffia l'immagine si degrada. Lo stesso dicasi per un edificio, perché le bolle si formano anche su uno spigolo dritto. In questo caso trovarsi su un tetto, sopra a tutto il resto, è meglio perché questo tipo di turbolenza è assente. Si è scoperto

che anche le classiche cupole sferiche con la loro apertura a spicchio generano turbolenza, e oggi vengono sostituite da cupole a scomparsa, che si aprono come petali, o scorrono via come tetto rimovibile.

Quindi il seeing dipende dalle differenze di temperatura tra aria e suolo e dagli ostacoli sopravvento.

Un altro accorgimento molto usato è quello di eliminare le differenze di temperatura tra telescopio e ambiente lasciando passare anche un'ora prima di osservare, una volta aperta la cupola (o la finestra, se siamo in una stanza) o sistemato fuori il telescopio.

Il telescopio nero –ovviamente- attira di più i raggi solari, e si scalda fino a scottare, conviene dipingerlo di bianco –come a Locarno- o ricoprirlo o imbragarlo con un telo bianco.

Lo scopo della cura del sito è ridurre a meno di 3" il seeing diurno per poter sfruttare il telescopio almeno al doppio del suo limite di diffrazione. Infatti un telescopio di apertura 10 cm ha un limite di diffrazione di 1", mentre uno di 20 cm ce l'ha di 0.5", ma se il seeing è di 2" è come avere telescopi di 5 cm sia in un caso che nell'altro, quindi l'acume visivo di uno strumento anche molto costoso, diventa pari a quello di un cannocchiale da banco a causa delle condizioni osservative.

Ci è capitato di notare questo con le lenti solari di s. Maria degli Angeli, che sono di 5 cm di diametro: i dettagli che si vedono sono simili a quelli osservati ai telescopi ottici di diametri maggiori. Il **seeing urbano di 5"** rende questi strumenti tutti equivalenti a telescopi con obbiettivi di 2 cm.

Vale dunque la formula di ottica atmosferica:

Potere risolutivo ["]= massimo tra{10"}/D[cm] e seeing ["]

Poiché il seeing è cruciale ed è il valore più grande dei due, ci dobbiamo concentrare sul ridurre –per quanto ci è possibile- il seeing, piuttosto che ridurre la diffrazione 10"/D con maggiori diametri D d'obbiettivo. Perciò, oltre un filtro solare a tutta apertura davanti all'obbiettivo, non raccomando altro tipo di strumentazione per l'osservazione del Sole al telescopio, né diametri particolarmente grandi, **solo costanza nell'osservare.**

Opportunities for the hybrid eclipse of April 20, 2023 in solar astrometry with smartphone videos

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(ICRA/UPRA e ITIS G. Ferraris, Roma)

Abstract The hybrid eclipse presents a narrow umbral zone. The lunar shadow is broken by Northern and Southern Baily beads, within only a few km. We need simple unfiltered VGA videos at zoom 4x, 30fps, ISO=100 and EV=-2, made from steady smartphones, geolocated, in the 10 minutes around the eclipse maximum. A 10 milli-arcsecond angular accuracy on the angular solar diameter by comparison with ephemerides, can be obtained after recovering the solar limb darkening function inflexion point. Some observational hints are recalled, to avoid unwanted technical mistakes.

Sommario L'eclissi ibrida del 20 aprile 2023 presenta una stretta fascia di ombra. L'ombra della Luna sarà rotta da "grani di Baily" prodotti da valli lunari sia a Nord che a Sud del nostro satellite, entro pochi chilometri di distanza a terra. Servono semplici video a zoom 4x, in formato VGA (30 fotogrammi al secondo e bassa risoluzione spaziale) ISO fissato a 100 ed EV=-2, geolocalizzati, che coprano 10 minuti a cavallo del massimo dell'eclissi, da posizione fissa. L'accuratezza di 10 millisecondi d'arco sul diametro solare angolare può essere ottenuta calcolando il punto di flesso della funzione di oscuramento al bordo solare attraverso l'evoluzione della luminosità dei Baily beads nelle varie valli lunari. Alcuni suggerimenti osservativi vengono forniti per sfruttare al meglio questa unica occasione, usando smartphones senza filtri con ghost image, ed evitare banali errori.

Keywords Sun, Solar diameter, Baily's beads, Videotiming, Geolocation, Limb darkening, Inflexion point, Smartphone, Astrometry, Citizen Science.

Introduction The hybrid eclipse of May 9th 1567 in Rome, is still bringing to our attention, after J. A. Eddy (1931-2009)¹, the problem of the secular variation of the solar diameter.

The dispute on that issue was concentrated, in the late seventies, to the inner corona appearance, in order to validate the observation published by Christopher Clavius (1538-1612). Clavius did not indicate his position in Rome² (then it should have been a normal one for him, like the Collegio Romano square, the former site of his University³).

¹ <https://www.nytimes.com/2009/06/18/us/18eddy.html> J. A. Eddy obituary

² Clavius, *Commentarius in Sphaeram*, Venice, 1581 edition.

³ ▷ [Collegio Romano \(info.roma.it\)](http://Collegio Romano (info.roma.it)) Palace of Giovanni Salviati in front the arch of Camillus, from 1557 to 1584 site of the Jesuit's University.

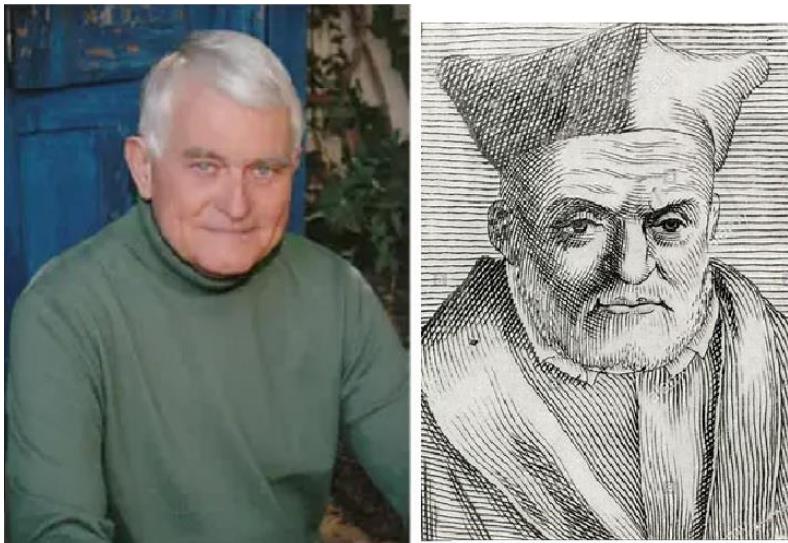


Fig. 1 Eddy and Clavius.

Hybrid Eclipses The nature of that 1567 eclipse was rapidly changing in a few km from total to annular, like the one of 2023. Clavius already observed a total eclipse in Coimbra in 1560 and he was expecting for full totality. Comparing with the ephemerides, the observation of Clavius, could be explained with a solar diameter increase of 4" with respect to the mean value of 1919.63" adopted by IAU. The search for secular variations of the solar diameter through total eclipses come out in the following decades. Either in the United States of America with the 1979 eclipse, jointed with data from the 1925 one, either with the Halley eclipse of 1715; in all of them the limits of the totality strip were known by observational accounts. For the 2023 hybrid eclipse, local people can be involved into science observations with their smartphones.

Baily beads for solar astrometry

D. W. Dunham in 1973 had proposed to observe the total eclipses from the limits of the totality to increase the duration of the Baily's beads, through which accurately locate the extension of the Moon shadow. The lunar profile of C. B. Watts (1963) was updated by Kaguya satellite in 2009, allowing a

very precise reference. Raponi and Sigismonti (2012) proposed to recover the inflexion point of the solar limb darkening function through the Baily beads' luminosity function, due to the varying exposed photospheric area.

Therefore combining information on the observer's position, lunar profile and Baily's beads absolute timing an accuracy up to 10 milli-arcsecond of arc become possible, as scientific result of a total or annular solar eclipse expedition.

Smartphones array for the hybrid eclipse

Disposing an array of **unfiltered smartphones** from the very limit of the eclipse (zero totality) to the place of the maximum, may allow a precise estimate of the solar diameter through the duration timing of the Baily beads. Video of the eclipse at 30 fps with maximum 4x zoom and **fixed ISO 100 EV=-2**, (then **not filtered**) within such a limited area could help to recover the angular diameter of the Sun during such eclipse with an accuracy below 0.01". When a **ghost image appear** in the video **the accuracy is even better**, because the Sun always saturates the image around it, even if there is a single bead.

Unwanted mistakes The smartphones are now fully automated and this is not good for limb darkening sampling, because the fainter is the light the higher is the ISO set by the camera, while we need a **fixed ISO and EV** to compare faint and bright phases of the beads. The spatial resolution of 4x digital (or optical) zoom is very low, the Sun is about 32 pixel diameter.

Do not believe, never, that the video is wrong and unuseful!

We are looking for 1/30 s timing resolution and a moderate angular resolution of 1' is tolerable.

Absolute timing resolution is always welcome (through imaging a reference watch) but the automatic setting of the camera through internet will allow always a good relative timing. So no problem if you have not such watch in the video.

The **camera may go off focus** automatically, especially if it aims only the Sun. **Let it go** and not change anything during the video. You can do a test of the camera setting leaving the Sun going behind a wall and recording that event for 4-5

minutes, two times. Better if the wall is 20 m far, like a bell-tower, a skyscraper or... an obelisk.⁴ The camera has to be fixed during the 10 minutes video, you can use books or small object to set it. **The video of the eclipse has to be continuos.** Make sure it is enough memo space for 20 minutes video.



Fig. 2 Smartphone set with Nov 3rd 2013 hybrid eclipse and 2006 march 29 last bead icon in Zawayet-al-Matallah, Egypt.

Do not go in front of the camera: it change focus, but never stop recording, always people are around. **Describe in voice what you see by eye or binoculars**, to increase data accuracy.

Conclusions We are eager to analyze these videos to obtain the current value of the solar diameter by using the most accurate ephemerides of Sun and Moon available and the upgraded lunar profiles from Jaxa Satellite Kaguya. Recording the hybrid eclipse with an unfiltered smartphone camera with 100 ISO offers a great opportunity for citizen science in solar astrometry

References C. B. Watts, *The marginal zones of the Moon* [link](#)

J. A. Eddy, et al., *Shrinking Sun, Sky & Tel.* **60**, p. 10, (1980).

D. W. Dunham and J. B. Dunham, *Moon* **8** 546 (1973) [link](#).

A. Raponi, et al. *Solar Physics* **278** 269 (2012). C. Sigismondi, https://youtu.be/wcMh3_n-pmM & <https://youtu.be/e7OsR9WdeTc> (2023)

⁴ <https://youtu.be/-q-lBvPRixw> Apr. 4 2023: on focus with ghost image
<https://youtu.be/t5xYtBnL4YY> Apr.10: eclipse off focus at the Vatican obelisk. April 11 2023: Video [tutorials](#) in English and [eclipse simulation](#).

L'esperimento di Eratostene nella zona temperata

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(*ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma*)

Federico Battistol, Elena Piccoli (Liceo A. Scarpa, Motta di Livenza)

Submitted February 10th 2023, revised and accepted February 24th

Abstract The measure of the Earth radius using the meridian arch between Rome and Motta di Livenza is repeated within an accuracy of 1 part over 1000. The Cassini correction for differential refraction is also included.

Sommario La misura del raggio della Terra è fatta usando l'arco di meridian tra Roma e Motta di Livenza, con un'accuratezza di una parte su mille. Anche la correzione di Cassini sulle altezze del Sole viene inclusa.

Keywords: Eratostene experiment, Earth Radius, Cassini refraction.

Introduzione: Il celebre esperimento di Eratostene non si riduce ad una sola misura di distanza zenitale, fatto ad Alessandria e alla constatazione che a Syene (Assuan) il Sole veniva riflesso in un pozzo, ma si trattava di un'impresa sostenibile solo dai Tolomei, che governavano l'Egitto e finanziavano la ricerca scientifica alla Biblioteca di Alessandria. Infatti la distanza di 5000 stadi tra le due città poteva essere il risultato di una misura complessa di molte triangolazioni e le due città non erano lungo lo stesso meridiano. Per conoscere la differenza di longitudine sarebbero state necessarie delle osservazioni combinate con misure meridiane di un'eclissi di Luna... molto di più che l'aneddoto del pozzo. Infine il Sole ha un diametro medio di 32' e il riflesso dal pozzo introduce un'incertezza di 32' su quale parte del Sole era riflessa. Quando il Sole è allo zenith, aggiungeva Eratostene, un palo verticale non getta ombra da nessun lato.

Dati dalla zona temperata: il meridiano di Roma

Dopo alcuni esperimenti in sincronia portati avanti tra Ottobre 2022 e Febbraio 2023, abbiamo trovato la soluzione che offre dati più accurati mediante la "meridiana a foro stenopeico nel vetro" realizzata su una finestra esposta a Sud disponibile nell'Istituto di Motta di Livenza, sullo stesso meridiano di

Roma. A Roma abbiamo usato i dati presi alla Basilica di S. Maria degli Angeli: entrambi il 10 febbraio 2023.

Roma: passaggio meridiano osservato alle 12:24:27.5 temperatura 12° C pressione 1030 mb. Distanza dalla base del foro stenopeico dei bordi del Sole: N 30130 mm e S 30756 mm. Altezza foro (orizzontale) 20353.44 mm, diametro 25 mm.

Motta di Livenza: altezza centro foro 2250mm diametro 15mm. Bordi del Sole N 3880.5 mm e S 3963.5 mm, alle 12:23:43.5.

Altezza meridiana e correzione di Cassini: si calcola l'angolo di altezza meridiana del Sole dalla media delle due altezze dei bordi del Sole. Entrambe a partire dalle tangenti corrispondenti e poi si passa all'altezza che avrebbe in assenza di atmosfera con la correzione cassiniana.

$\tan z = \text{Lunghezza}/\text{altezza}$

Altezza $\theta = 90^\circ - z = 90^\circ - \arctan(\text{lunghezza}/\text{altezza})$

Correzione $\theta' = \theta - 60'' \tan(z)$

Nella tabella seguente sono rappresentate le altezze apparenti dei bordi Sud e Nord e del centro del Sole \odot , ed il corrispondente valore fuori dall'atmosfera θ' .

Luogo	Sud \odot	Nord \odot	Centro \odot	Cassini θ'
Roma SMA	34.03984	33.49545	33.767645	33.742716
Motta Livenza	30.80942	29.582714	30.106109	29.844412

La differenza tra le due altezze meridiane corrisponde alla differenza in latitudine: 3.898304°, arco di meridiano: distanza reciproca (con google maps: 430 km).

Circonferenza (polare) terrestre: $430 \cdot 360 / 3.898304 = 39709$ km.

Conclusioni: La correzione di Cassini è determinante per la riuscita della misura, infatti senza la differenza di altezze sarebbe 3.661536° e la circonferenza della Terra risulterebbe maggiore, pari a 42277 km.

Referenze L. Russo, *La Rivoluzione Dimenticata*, Feltrinelli.

C. Sigismondi, youtube 9 dicembre 2013 a Rio de Janeiro

C. Sigismondi, *Gerbertus* 18, 83-86 (2022).

Il calcolo dell'età della Luna nel calendario gregoriano

Giuseppe Giudice

giudice@unina.it

(Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della
Produzione Industriale, Univ. Federico II, Napoli)

Submitted February 24th 2023, revised and accepted April 12th

Abstract When Gregorius XIII reformed the Calendar, aimed mainly to calculate exactly the date of Easter, according to the prescription of Nicaean Council, based on the Full Moon after the Spring Equinox; nevertheless, an algorithm determining the phases of the Moon was added, in order to declare for every day the Moon age (i.e., the number of days elapsed since the first moon visible after the New Moon), during the celebration of Martiology, or list of the Saints in each day.

This algorithm requires no calculations, but only the use of tables, but contains sum subtlety.

Sommario La riforma del calendario promulgata da Gregorio XIII nel 1582 aveva per oggetto anche il calcolo esatto della Pasqua secondo le prescrizioni del Concilio di Nicea; a tale scopo era necessario il calcolo della Luna piena di primavera. Tale proposito fu però ampliato fino a calcolare le fasi della Luna, in maniera approssimata, per tutto l'anno.

Nella lettura del Martiologio, o elenco dei santi del giorno, si premettava l'enunciazione dell'età della Luna, ossia il numero di giorni trascorsi dall'apparizione della primafalce di Luna ad occidente.

L'algoritmo non richiede calcoli ma solo consultazione di tabelle, che peraltro nascondono aspetti poco noti.

Keywords: Lunar theory, Easter Computus, Gregorian Calendar.

Chiarimento di alcuni termini:

Mese Lunare: si intende il mese sinodico, da Luna nuova a Luna nuova.

Età della Luna è il numero dei giorni del mese Lunare, ossia l'età della Luna è 1 nel giorno dell'apparizione della prima falce ad occidente (questo giorno è anche detto *Luna nuova ecclesiastica*), 2 il giorno successivo e così via.

La Lunazione media è di 29 giorni e 1/2 per cui, nell'approssimazione di 1 giorno, si alternano mesi di 30

giorni (detti mesi pieni) e mesi di 29 giorni (detti mesi cavi). I mesi pieni sono all'incirca quelli dispari, i mesi cavi quelli pari. Talvolta occorre intercalare un tredicesimo mese, detto *mese embolismico*; infatti l'anno Lunare è di $29,5 \times 12 = 354$ giorni e quindi è più breve dell'anno solare di 11 giorni (in questi calcoli non si considera il bisesto). Quindi ogni tre anni circa si recupera un ulteriore mese. In 19 anni si hanno 235 mesi Lunari, quindi ci saranno 7 mesi embolismici ($235 = 12 \times 19 + 7$). I dodici mesi regolari sono alternativamente di 30 e 29 giorni e i mesi embolismici o intercalari sono sei di 30 giorni e uno di 29.

Epatta: è il numero dei giorni della Lunazione nella quale inizia l'anno e che fanno parte dell'anno precedente; essi vengono in qualche modo "trasportati" nell'anno nuovo per formarne il primo mese Lunare. In altri termini, epatta è l'età della Luna nel giorno zero di gennaio, ossia il 31 dicembre dell'anno precedente. L'epatta si indica in genere in numeri romani scritti in rosso, con qualche eccezione; se l'epatta è 30 si usa il segno * (asterisco).

Nota bene: l'epatta va in vigore il 1° gennaio, fino al 31 dicembre, checché si dica in rete, dove spesso, anche su siti di astrofili molto seri, si afferma che l'epatta di ciascun anno vige dal primo marzo al 28 (o 29) febbraio dell'anno successivo.

Ciclo di Metone è il periodo di 19 anni, e 235 mesi Lunari, trascorso il quale le Lune si ripetono negli stessi giorni; il numero d'ordine dell'anno all'interno del ciclo su chiama *numero d'oro*. L'attuale ciclo è iniziato nel 2014 (numero

d'oro 1), per cui il 2023 ha numero d'oro 10; esso terminerà nel 2032 (numero d'oro 19), mentre nell'anno successivo, 2033, inizierà un nuovo ciclo.

La tabella giornaliera delle epatte: Per determinare la Luna nuova ecclesiastica si usa una tabella, riportata nei vecchi messali e nei vecchi breviari, e qui inserita in forma sintetica come Tabella 1 (nella tabella originale ci sono anche per ogni giorno la data del calendario romano e il santo che si celebra), in cui ogni giorno è contrassegnato con un numero di epatta, in genere scritto in rosso e in numeri romani; per esempio il 24 febbraio è contrassegnato col numero **v** (5). Nel 2023 l'epatta è **viii** che nella tabella 1 è in corrispondenza del 21 febbraio; perciò la Luna nuova ecclesiastica è il 21 febbraio (età della Luna uguale a 1) e il 24 febbraio è il 4^o giorno della Luna.

Tabella 1: Numero di Epatta per tutti i giorni dell'anno

	Gen	Feb	Feb(bis)	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1	*	xxix	xxix	*	xxix	xxviii	xxvii	xxvi	xxv xxiv	xxiii	xxii	xxi	xx
2	xxix	xxviii	xxvii	xxix	xxviii	xxvii	xxvi 25	xxv 25	xxiii	xxii	xxi	xx	xix
3	xxviii	xxvii	xxvii	xxviii	xxvii	xxvi	xxv xxiv	xxiv	xxii	xxi	xx	xix	xviii
4	xxvii	xxvi 25	xxvi 25	xxvii	xxvi 25	xxv 25	xxiii	xxiii	xxi	xx	xix	xviii	xvii
5	xxvi	xxv xxiv	xxv xxiv	xxvi	xxv xxiv	xxiv	xxii	xxii	xx	xix	xviii	xvii	xvi
6	xxv 25	xxiii	xxiii	xxv 25	xxiii	xxiii	xxi	xxi	xix	xviii	xvii	xvi	xv
7	xxiv	xxii	xxii	xxiv	xxii	xxii	xx	xx	xviii	xvii	xvi	xv	xiv
8	xxiii	xxi	xxi	xxiii	xxi	xxi	xix	xix	xvii	xvi	xv	xiv	xiii
9	xxii	xx	xx	xxii	xx	xx	xviii	xviii	xvi	xv	xiv	xiii	xii
10	xxi	xix	xix	xxi	xix	xix	xvii	xvii	xv	xiv	xiii	xii	xi
11	xx	xviii	xviii	xx	xviii	xviii	xvi	xvi	xiv	xiii	xii	xi	x
12	xix	xvii	xvii	xix	xvii	xvii	xv	xv	xiii	xii	xi	x	ix
13	xviii	xvi	xvi	xviii	xvi	xvi	xiv	xiv	xii	xi	x	ix	viii
14	xvii	xv	xv	xvii	xv	xv	xiii	xiii	xi	x	ix	viii	vii
15	xvi	xiv	xiv	xvi	xiv	xiv	xii	xii	x	ix	viii	vii	vi
16	xv	xiii	xiii	xv	xiii	xiii	xi	xi	ix	viii	vii	vi	v
17	xiv	xii	xii	xiv	xii	xii	x	x	viii	vii	vi	v	iv
18	xiii	xi	xi	xiii	xi	xi	ix	ix	vii	vi	v	iv	iii
19	xii	x	x	xii	x	x	viii	viii	vi	v	iv	iii	ii
20	xi	ix	ix	xi	ix	ix	vii	vii	v	iv	iii	ii	i
21	x	viii	viii	x	viii	viii	vi	vi	iv	iii	ii	i	*
22	ix	vii	vii	ix	vii	vii	v	v	iii	ii	i	*	xxix
23	viii	vi	vi	viii	vi	vi	iv	iv	ii	i	*	xxix	xxviii
24	vii	v	v	vii	v	v	iii	iii	i	*	xxix	xxviii	xxvii
25	vi	lv	v	vi	iv	iv	ii	ii	*	xxix	xxviii	xxvii	xxvi
26	v	iii	iv	v	iii	iii	i	i	xxix	xxviii	xxvii	xxvi 25	xxv 25
27	iv	ii	iii	iv	ii	ii	*	*	xxvii	xxvii	xxvi	xxv xxiv	xxiv
28	iii	i	ii	iii	i	i	xxix	xxix	xxvii	xxvi 25	xxv 25	xxiii	xxii
29	ii		i	ii	*	*	xxviii	xxviii	xxvi	xxv xxiv	xxiv	xxii	xxii
30	i		i	xxix	xxix	xxvii	xxvii	xxv 25	xxiii	xxiii	xxi	xxi	xx
31	*		*		xxviii		xxvi 25	xxiv		xxii			xx 19

Questa tabella vale anche negli anni bisestili, nei quali però si ripete per il 25 febbraio l'epatta **v** del 24 febbraio, e si scalano per i giorni successivi, riportata nella quarta colonna della tabella 1, dedicata al febbraio degli anni bisestili; talvolta si deve computare un mese Lunare di 31 giorni, ma questo errore è considerato trascurabile.

Le Lune nuove e Lune piene ecclesiastiche per l'anno 2023, come determinate dalla Tabella 1, sono riportate nella tabella 2 assieme con le corrispondenti Lune astronomiche:

Tabella 2: Lune nuove e Lune piene per il 2023

Luna nuova ecclesiastica	Luna nuova astronomica	Luna piena ecclesiastica	Luna piena astronomica
24 dic. 2022	23 dic. 2022	6 gennaio	6 gennaio
23 gennaio	21 gennaio	5 febbraio	5 febbraio
21 febbraio	20 febbraio	6 marzo	7 marzo
23 marzo	21 marzo	5 aprile	6 aprile
21 aprile	20 aprile	4 maggio	5 maggio
21 maggio	19 maggio	3 giugno	4 giugno
19 giugno	18 giugno	2 luglio	3 luglio
19 luglio	17 luglio	1º agosto	1º agosto
17 agosto	16 agosto	30 agosto	31 agosto
16 settembre	15 settembre	29 settembre	29 settembre
15 ottobre	14 ottobre	28 ottobre	28 ottobre
14 novembre	13 novembre	27 novembre	27 novembre
13 dicembre	12 dicembre	26 dicembre	26 dicembre

Il ritardo di uno o due giorni della Luna nuova ecclesiastica rispetto a quella astronomica è giustificato perché la prima segna l'apparire della prima falce e non l'opposizione.

Come si determinano le epatte per ciascun anno.

Si parte dall'anno 1 del ciclo di Metone (2014) con l'epatta 29 che comporta l'ultima Luna nuova ecclesiastica il 23 dicembre (si veda la tabella 1), quindi il 31 dicembre l'età della Luna è 10, e questa è l'epatta per il 2015.

L'ultima Luna nuova ecclesiastica del 2015 è l'11 dicembre, quindi il 31 dicembre l'età della Luna è 21, e questa è l'epatta del 2016, e così si procede di anno in anno.

La regola quindi è: all'epatta dell'anno corrente si somma 11 e se necessario si sottrae 30 (Nel passaggio dal 2014 al 2015 si ha $29 + 11 - 30 = 10$), e così si procede fino all'anno 19 del ciclo di Metone (ossia il 2032), in cui l'epatta è 17 e l'età della Luna il 31 dicembre è 28, però in questo caso tale giorno si conta come se fossero due (come segnalato dall'epatta 19 nera, che si usa solo nell'ultimo giorno del ciclo di Metone), per cui l'epatta dell'anno successivo è 29 e così si chiude il ciclo.

Ecco la tabella completa (Tab. 3) delle epatte in corrispondenza col Numero d'Oro, valevole, come vedremo subito, per il periodo 1900-2199:

Tabella 3: Epatte in corrispondenza del Numero d'Oro per gli anni 1900-2199

Numero d'Oro	Epatta	Numero d'Oro	Epatta
1	xxix	11	xix
2	x	12	*
3	xxi	13	xi
4	ii	14	xxii
5	xiii	15	iii
6	xxiv	16	xiv
7	v	17	25
8	xvi	18	vi
9	xxvii	19	xvii
10	viii		

Variazione secolare delle epatte.

Abbiamo visto che c'è una corrispondenza tra numero d'oro e numero di epatta, ma questo comporterebbe che il ciclo di Metone sia di 19 anni esatti, e ciò non è; nel calendario gregoriano si introducono perciò delle correzioni.

Si considerano inizialmente gli anni come tutti di 365,25; in questo caso il ciclo di Metone è di $19 \times 365,25 = 6939,75$ giorni. Però 235 mesi Lunari sono $29,53059 \times 235 = 6939,6865$, quindi per ogni ciclo di Metone la Luna

anticipa di 0,0635 giorni ossia 1h 31m 26,4s, quindi nel decimo anno del ciclo, alla lunga, la Luna nuova sarà non il 23 gennaio ma il 22 e poi il 21 eccetera, per cui l'epatta dovrebbe essere aumentata di 1 ogni certo numero di anni. Con il numero da me adottato per il mese Lunare l'anticipo sarà di 1 giorno ogni 15,748 cicli di Metone, cioè 299,2 anni. Nel calendario gregoriano si adotta un giorno di anticipo ogni 312,5 anni, ossia 8 giorni ogni 2500 anni.

Questa correzione in aumento delle epatte si chiama *equazione Lunare* e viene adottata all'inizio degli anni 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300, 3699, 3900 e poi dopo 400 anni nel 4300.

Però a questa correzione, che tende ad aumentare le epatte si oppone, ed è prevalente, quella dovuta alla minore durata dell'anno rispetto alla durata nominale di 365,25 giorni. Come si sa, la durata media adottata nel calendario gregoriano è di 365,2425 giorni, che comporta la correzione di 1 giorno ogni 133,3 anni, ossia 3 giorni ogni 400 anni. Importa notare che questa correzione comporta una diminuzione delle epatte; infatti il 29 febbraio 1900 fu soppresso e fu chiamato 1° marzo, cosicché essendo quell'anno stata prevista la Luna nuova il 2 marzo, questo era ufficialmente denominato 3 marzo, che ha un'epatta inferiore di 1.

Questa correzione, detta *equazione solare*, comporta perciò una diminuzione dell'epatta negli anni 1700, 1800, 1900, 2100 e così via e, mentre ai fini del calendario civile viene effettuata sopprimendo il 29 febbraio, ai fini del calcolo

delle Lune viene effettuata il 1° gennaio, in quanto per i due primi mesi si tollera l'ulteriore errore di un giorno.

Quindi le epatte aumentano di 1 una volta ogni 300 anni circa per effetto dell'equazione Lunare e diminuiscono di 1 una volta ogni 133 anni in media per effetto dell'equazione solare, per cui alla lunga tendono a diminuire, a parità di numero d'oro.

Si noti che in alcuni anni, per esempio il 1800 e il 2100, sono previste entrambe le equazioni, le quali, avendo segno opposto, si annullano, e infatti, vedi tabella 4, nel passaggio tra XVIII e XIX secolo e nel passaggio tra XXI e XXII secolo le epatte non variano.

In definitiva: gli errori accumulati nel periodo gli anni 315-1582 vennero corretti in un colpo solo, spostando le Lune di dieci giorni in ritardo per effetto dell'equazione solare e di tre giorni in anticipo per effetto dell'equazione Lunare, per cui ritardarono di 7 giorni e le epatte diminuirono corrispondentemente di 7, per cui nell'anno 1 del ciclo di Metone passarono da **viii** a **i**.

L'anno della correzione 1582 ha numero d'oro 6, cui nel calendario giuliano corrispondeva il numero d'epatta **iii** e nel gregoriano **xxvi**; il 4 ottobre 1582 l'età della Luna era computata 14 (che significava che era Luna piena) e il 15 ottobre l'età della Luna era 18 (che significava che la Luna piena era stata 4 giorni prima, cioè il 1° ottobre). Nella realtà astronomica la Luna piena fu proprio il 1° ottobre, quindi si era ottenuto la correzione. La Luna nuova

astronomica dell'ottobre 1582 fu il 26, mentre quella ecclesiastica prevista dal calendario gregoriano fu il 27.

Per effetto delle due correzioni (equazioni) la tabella completa delle epatte (almeno per i primi millenni) è nella tabella 4.

Calcolo delle Lune nuove per qualsiasi data di qualsiasi anno

Per calcolare la Luna nuova ecclesiastica per una qualsiasi data, occorre innanzitutto il numero d'oro; questo si ottiene, nel modo più pratico, dividendo l'anno considerato per 19, prendendo il resto, e aggiungendo 1. Per esempio, per il 1582 il resto della divisione per 19 è 5, per cui il numero d'oro è 6; per il 1956 il resto della divisione per 19 è 18, per cui il numero d'oro è 19; per il 2014 il resto della divisione per 19 è 0, per cui il numero d'oro è 1.

Si entra poi nella tabella precedente, che tiene conto del secolo, per trovare il numero di epatta, e poi si entra nella tabella in appendice e si determinano le Lune nuove ecclesiastiche.

Faccio l'esempio del 1628, l'anno in cui Don Abbondio incontrò (il 7 novembre), per sua disgrazia, i bravi di Don Rodrigo, come narrato nel primo capitolo dei *Promessi Sposi*.

Il resto della divisione 1628:19 è 13, per cui il numero d'oro è 14; nella tabella 4 si entra nella colonna relativa agli anni 1583-1699, per cui l'epatta è **xxiv**. Nella tabella in appendice si vede che la Luna nuova ecclesiastica per il periodo che ci interessa cade il 29 ottobre, per cui il quattordicesimo giorno della Luna (Luna piena) è l'11 novembre, il giorno dopo quello in cui i due promessi sposi, destinati a rimanere tali, tentano il loro matrimonio a sorpresa, e i bravi di Don Rodrigo tentano il rapimento di Lucia. Anche nella realtà astronomica la Luna piena fu il giorno sabato 11 novembre.

Manzoni, che evidentemente aveva fatto bene i suoi calcoli, così descrive la scena del 10 sera: "Era il più bel chiaro di Luna; l'ombra della chiesa, e più in fuori l'ombra lunga e acuta del campanile, si stendeva bruna e spiccata sul piano erboso e lucente della piazza: ogni oggetto si poteva distinguere, quasi come di giorno" (I Promessi Sposi, capitolo VIII). Si era evidentemente molto vicini alla Luna piena, e Manzoni lo sapeva benissimo.

Tabella 4: Epatte in corrispondenza del Numero d'oro per gli anni fino al 3399

Numer o d'oro	Calend. giuliano	1583- 1699	1700- 1899	1900- 2199	2200- 2299	2300- 2399	2400- 2499	2500- 2599	2600- 2899	2900- 3099	3100- 3399
1	viii	i	*	xxix	xxviii	xxvii	xxviii	xxvii	xxvi	xxv	xxiv
2	xix	xii	xi	x	ix	viii	ix	viii	vii	vi	v
3	*	xxiii	xxii	xxi	xx	xix	xx	xix	xviii	xvii	xvi
4	xi	iv	iii	ii	i	*	i	*	xxix	xxviii	xxvii
5	xxii	xv	xiv	xiii	xii	xi	xii	xi	x	ix	viii
6	iii	xxvi	xxv	xxiv	xxiii	xxii	xxiii	xxii	xxi	xx	xix
7	xiv	vii	vi	v	iv	iii	iv	iii	ii	i	*
8	xxv	xviii	xvii	xvi	xv	xiv	xv	xiv	xiii	xii	xi
9	vi	xxix	xxviii	xxvii	xxvi	xxv	xxvi	xxv	xxiv	xxiii	xxii
10	xvii	x	ix	viii	vii	vi	vii	vi	v	iv	iii
11	xxviii	xxi	xx	xix	xviii	xvii	xviii	xvii	xvi	xv	xiv
12	ix	ii	i	*	xxix	xxviii	xxix	xxviii	xxvii	xxvi	25
13	xx	xiii	xii	xi	x	ix	x	ix	viii	vii	vi
14	i	xxiv	xxiii	xxii	xxi	xx	xxi	xx	xix	xviii	xvii
15	xii	v	lv	lii	li	i	lii	i	*	xxix	xxviii
16	xxiii	xvi	xv	xiv	xiii	xii	xiii	xii	xi	x	ix
17	iv	xxvii	xxvi	25	xxiv	xxiii	xxiv	xxiii	xxii	xxi	xx
18	xv	viii	vii	vi	v	iv	v	iv	iii	ii	i
19	xxvi	xix	xviii	xvii	xvi	xv	xvi	xv	xiv	xiii	xii

Tre giorni dopo, il lunedì 13 novembre, Renzo che dopo la precipitosa fuga da Milano si apprestava a passare l'Adda, uscito fuori dal suo rifugio notturno, guarda in alto: "Il cielo prometteva una bella giornata: la Luna, in un canto, pallida e senza raggio, pure spiccava nel campo immenso di un bigio ceruleo; che, giù verso oriente, s'andava sfumando leggermente in giallo roseo" (I Promessi Sposi, cap. XVII). Dovevano essere le 6 di mattina e mancavano forse due ore al tramonto della Luna, essendo 2 giorni dopo la Luna piena astronomica.

Uso della tabella del Martirologio

Se poi si volesse l'età della Luna in un qualsiasi giorno dell'anno senza fare calcoli ma solo utilizzando una tabella, si può consultare il Martirologio, libro liturgico purtroppo scomparso (qualche esemplare è reperibile in rete, di cui un esempio in bibliografia) e che prevedeva ogni giorno, prima dell'elenco dei santi che in quel giorno si festeggiavano, l'enunciazione dell'età della Luna; quindi in testa ad ogni pagina (una pagina per ogni giorno) c'era l'età della Luna sotto una lettera (*lettera del Martirologio*), che variava anno per anno e che era in corrispondenza biunivoca con l'epatta (all'epatta **i** corrispondeva la a minuscola, al **ii** la b minuscola e così via).

Tabella 5: Corrispondenza tra numero di epatta e Lettera del Martirologio

Epatta	Lettera del Martiro- logio	Epatta	Lettera del Martiro- logio	Epatta	Lettera del Martiro- logio	Epatta	Lettera del Martiro- logio
i	a	ix	i	xvii	s	xxv	F
ii	b	x	k	xviii	t	25	F
iii	c	xi	l	xix	u	xxvi	G
iv	d	xii	m	xx	A	xxvii	H
v	e	xiii	n	xxi	B	xxviii	M
vi	f	xiv	p	xxii	C	xxix	N
vii	g	xv	q	xxiii	D	*	P
viii	h	xvi	r	xxiv	E		

La tabella completa è troppo lunga per essere qui riportata, per cui mi limito al mese di gennaio, riportato nella successiva tabella 6, e agli ultimi giorni di dicembre (tabella 7). Siccome per il 2023 l'epatta è **viii** cui corrisponde la lettera h del Martirologio, vediamo che il primo gennaio l'età della Luna è 9, il 2 gennaio è 10 e così via. Va detto che nell'anno 1 del ciclo di Metone i numeri relativi alla prima Lunazione dell'anno vanno diminuiti di 1, per compensare il fatto che l'epatta è stata aumentata di 12 invece che di 11; così, questa Lunazione è sempre di 29 giorni. Vi sono due eccezioni, cioè quando l'epatta è * (lettera P) e che inizia il primo gennaio, e quando l'epatta è **i** e quindi l'anno precedente era **xix**. In quest'ultimo caso per il 31 dicembre si prende l'epatta 19 nera, che si comporta esattamente come la normale epatta **xix**, per cui l'ultima Luna nuova dell'anno è il 31 dicembre; tuttavia, questo caso si presenterà fra parecchi millenni.

Il calcolo dell'età della Luna è un aspetto poco noto del calendario gregoriano, chiaramente indispensabile per il calcolo della data della Pasqua; ma ovviamente per questo calcolo bastava determinare le Lune piene dei mesi di marzo e aprile. Si è scelto invece di elaborare un metodo di calcolo delle fasi Lunari, ancora oggi utile come primo orientamento per la loro determinazione.

Tabella 6: Età della Luna per il mese di gennaio,
in corrispondenza con le Lettere del Martirologio

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	p	q	r	s	t	u	A	B	C	D	E	F	F	G	H	M	N	P	
1 gen	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	30	1	
2 gen	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	27	28	29	30	1	2	
3 gen	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	28	29	30	1	2	3	
4 gen	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4		
5 gen	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	30	1	2	3	4	5	
6 gen	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	1	2	3	4	5	6	
7 gen	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	2	3	4	5	6	7	
8 gen	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	3	4	5	6	7	8	
9 gen	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	
10 gen	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	10	
11 gen	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10	11	
12 gen	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	
13 gen	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	13	
14 gen	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	10	11	12	13	14	
15 gen	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	11	12	13	14	15	
16 gen	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11	12	13	14	15	16	
17 gen	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	12	12	13	14	15	16	17	
18 gen	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	14	15	16	17	18	
19 gen	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11	13	14	14	15	16	17	18	19	
20 gen	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15	16	17	18	19	20	
21 gen	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	16	17	18	19	20	21	
22 gen	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	17	18	19	20	21	22	
23 gen	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	
24 gen	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19	20	21	22	23	24	
25 gen	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19	20	20	21	22	23	24	
26 gen	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	21	22	23	24	25	26	
27 gen	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	22	23	24	25	26	27	
28 gen	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23	24	25	26	27	28	
29 gen	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	25	26	27	28	29	30
30 gen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	30	1
31 gen	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	30	1	

Tabella 7: Età della Luna per gli ultimi giorni di dicembre, in corrispondenza con le Lettere del Martirologio

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	p	q	r	s	t	u	A	B	C	D	E	F	F	G	H	M	N	P		
19 dic	29	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23	24	24	25	26	27	28		
20 dic	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19	20	21	22	23	24	24	25	25	26	27	28	29	
21 dic	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	25	26	26	27	29	29	1	
22 dic	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	20	21	22	23	24	25	26	26	27	27	28	29	1	2
23 dic	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	27	28	28	29	1	2	3	
24 dic	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	28	29	29	1	2	3	4	
25 dic	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	29	30	1	2	3	4	5	
26 dic	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	1	2	3	4	5	6	
27 dic	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	2	3	4	5	6	7	
28 dic	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	3	4	5	6	7	8	
29 dic	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	
30 dic	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	10	11
31 dic	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10	11		

Bibliografia Les textes constitutifs du calendrier grégorien, di Rodolphe Audette¹

Calendars and related questions, di Giuseppe Giudice²

Kalendarium Gregorianum perpetuum, 1582³

Christophorus Clavius, Romani Calendarii A Gregorio XIII. P. M. restituti explicatio, 1603⁴

Martirologio Romano, quarta edizione italiana, 1965⁵

Missale Romanum, Benziger Brothers, 1962⁶

Missale Romanum, Bonn, 2004⁷

¹ <https://web.archive.org/web/20041018174218/http://hermes.ulaval.ca/%7E sitrau/calgreg/>

² contiene la traduzione italiana della bolla Inter Gravissimas e dei relativi canoni (che sono una sorta di allegati tecnici)

<https://web.archive.org/web/20221205202338/http://dpgi.unina.it/giudice/calendar/calendar.html>

³ https://ia600407.us.archive.org/30/items/bub_gb_O9TNZ9_Fmw4C/bub_gb_O9TNZ9_Fmw4C.pdf

⁴ <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/MPIWG:P35YUZP5>

⁵ <https://www.sursumcorda.cloud/downloads/Martirologio-Romano.pdf>

⁶ <https://archive.org/details/missale-romanum-1962/>

con tabella delle epatte per ogni giorno dell'anno, alle pagg. xliv-xlix

⁷ <https://archive.org/details/MissaleRomanumBenedettoXV>

con tabella delle epatte per ogni giorno dell'anno, alle pagg. 26*-36*

Misurare il Sole: storia recente dell’eliometria

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma)

Submitted April 14th 2023, revised and accepted April 20th

Abstract The diameter of the Sun has been measured accurately since the end of XIX century, when the hypothesis for energy production was by gravitational contraction. The possibility of a larger Sun in 1567, after the annular eclipse seen by Clavius in Rome, was investigated with celestial mechanics, eclipse data mining and eclipse observational champaigns. In the Solar Disk Sextant balloon-borne experiment a telescope with a wedge before the objective repeated the geometry used in XIX century to reach the 0.01" accuracy without atmospheric turbulence. The Baily’s beads apparition/disparition timing during central eclipses are much less affected by turbulence, and in the last 4 decades special missions were dedicated to record this phenomenon. A number N of Baily beads improve the definition of the solar diameter by $\sim 1/\sqrt{N}$ with respect to the sole totality duration. The hybrid eclipses, annular total or broken annular, offer a larger number of Baily’s beads, achievable with a smartphone VGA 4x ISO 100 steady and continuous video, through the inspection of the Sun’s ghost image. As participant to this historical phase of the solar astrometry I review the Sextant, the Astrolabes and the Eclipses methods. According either to gravitational contraction and to nuclear fusion theories the consequent variation of the solar diameter would not be observable even in a century, but for an accurate definition of the solar diameter the measures have been done; the “constant” diameter was 1919.26" in 1891 and 1919.98" in 2015.

Sommario Eclissi con perle di Baily, astrolabi solari ed eliometri con prismi sono fenomeni e strumenti incontrati assieme ai protagonisti di questa fase della storia della misurazione del Sole. Tanto a fine ottocento quanto oggi il diametro solare –se legato all’evoluzione stellare sia da contrazione gravitazionale globale, sia da fusione nucleare- non dovrebbe essere osservabile nelle sue variazioni. La possibile maggior dimensione del Sole ipotizzabile durante l’eclissi anulare del 1567, che ebbe come unico testimone autorevole il padre Clavio a Roma, ha aggiunto agli studi sulla variazione secolare dell’attività solare anche quella del suo diametro. Errori di misura, difficoltà intrinseche degli esperimenti e analisi dati complicate, sono raccontate da chi ha partecipato a questo studio durante l’ultimo quarto di secolo. Il diametro solare nel 1891 era di 191.26" e 1919.98" nel 2015. Poiché il numero N di perle di Baily durante le eclissi centrali aumenta la precisione della misura del diametro solare di $\sim 1/\sqrt{N}$ un video VGA ISO 100 stabile e continuo, tramite la ghost image del Sole ne può cogliere molti durante un’eclissi ibrida anulare-totale.

Keywords: Sun: radius, Baily beads, astrolabe, heliometer, hybrid eclipses.

Misurare il Sole con la Luna

Alla fine del millennio scorso, era il 1999, andai a Monaco di Baviera a vedere l'eclissi totale di Sole. Subito dopo ottenni una borsa di studio dall'Osservatorio di Roma a Monte Mario per studiare a Yale negli Stati Uniti il diametro del Sole mediante le eclissi. Così nel 2000 partii per l'America, per andarci a lavorare.

Il fascino delle eclissi aveva ridato vita alla passione per l'Astronomia per la quale avevo fatto le mie scelte scolastiche, prima, e universitarie, poi.

Andai, dunque, in America con il seguente bagaglio: trent'anni, vestiti pesanti per l'inverno continentale, tanta astronomia sui libri (laurea e dottorato in Fisica teorica) e osservata al mio telescopio, un'eclissi totale osservata dal vivo.

I primi approcci con il Nuovo Mondo, da emigrato, o cervello in fuga, come si usava dire, furono buoni. In realtà non avevo per niente intenzione di fuggire dall'Italia, era solo l'occasione che mi si era presentata di andare fuori per lavoro.

Il tema della borsa di studio era proprio quello "della misura del diametro solare con le eclissi di Sole" e si intendeva le eclissi storiche.

L'idea che c'era dietro questa borsa era quella di riprendere le analisi fatte nei decenni precedenti per vedere se si poteva mostrare che il Sole, nel passato, aveva cambiato diametro.

Adesso, dopo 24 anni, vedo le cose da una prospettiva più ampia, e ve la racconto in questo articolo.

1) il diametro solare è una delle "costanti" astronomiche di riferimento, sia nei libri che nei programmi spaziali.

2) questo valore -costante- è di 1919.26" ad una Unità Astronomica. (si tratta di un diametro angolare, ma può essere tradotto in chilometri, circa 1 milione e 392 mila).

3) e qui viene il bello: questo valore è stato misurato da A. Auwers nel 1891!

Tra il punto 2 e il punto 3 possiamo mettere tutta l'essenza del programma dei corsi di Fisica, ossia cos'è l'incertezza di una misura e come si indica.

2a) quindi diciamo che se la misura del diametro solare è 1919.26" significa -se non è stato aggiunto altro- che è compresa tra 1919.25" e 1919.27".

Ossia su sei cifre significative l'ultima è incerta di una unità. Una precisione di una parte su duecentomila, quindi:

2b) essendo pari a 1.4 milioni di km quella parte è 7 km.

Conclusioni: la comunità astronomica internazionale considera il diametro del Sole costante entro +/- 7 km, tanto nel 2000 quanto oggi, basandosi su una misura del 1891.

La sua misura usando la Luna (quindi le sue eclissi) sarebbe servita a porre un punto fermo su questo parametro.

Il diametro del Sole alla fine del secolo della termodinamica

In questo secondo paragrafo della saga del diametro solare facciamo un passo indietro e ci mettiamo nel 1891.

In quell'epoca l'ottica astronomica aveva raggiunto la perfezione tecnica su tutti gli strumenti professionali.

Erano tutti pezzi di artigianato pregevolissimi.

Ogni telescopio, lungo fino a 20 metri, era meccanicamente equilibrato in modo da poter essere spostato con un mignolo, e le sue lenti lavorate fino alla precisione massima di "lambda/10", cioè 1/10 della lunghezza d'onda della luce, cioè 50 nanometri. Gli strumenti ottici di adesso, a controllo numerico, non sono migliori, ma sono cambiate le tecniche osservative, con l'avvento della fotografia elettronica.

Quando una Università crea un Osservatorio Astronomico, e fa costruire un telescopio, si ha in mente un programma osservativo, degli obiettivi scientifici, a seconda dei quali si progettano le caratteristiche dello strumento.

Ebbene a Goettingen, dove lavorava Auwers, Schur e Ambronn avevano progettato un eliometro (=misuratore del Sole) munito di un prisma davanti alla lente obiettiva grande quanto la lente. Teniamo presente che il progetto, lo strumento e i risultati erano talmente buoni che furono replicati a partire dal 1984 alla NASA nel progetto SDS a cui ho partecipato anche io dal 2000.

Questo strumento del 1891 doveva misurare il diametro solare con la precisione di qualche chilometro. Ma perché?

La Germania dell'Ottocento è stata la patria di molti fisici che hanno fatto la storia della Termodinamica, come Walter Nernst, Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann, August Otto ...

Lo studio del calore come energia sfruttabile nasceva dalla rivoluzione industriale e tutti i teoremi che riguardano energia interna, energia libera, entalpia... servivano -nella pratica- a sapere come meglio sfruttare l'energia dei motori termici.

Poi i fisici teorici ne hanno fatto un mondo a sé, e la scuola e l'università non lo hanno presentato sempre nel modo più accattivante, che è sempre il processo storico.

La termodinamica nasceva da esigenze pratiche dell'industria, invece, e dall'idea che con una caldaia si voleva ottenere il massimo rendimento possibile. Per fare ciò bisogna conoscere bene come si comporta il vapore, e quindi tutto sui gas.

Già alla fine del seicento Robert Boyle aveva scoperto che comprimendo un gas questo diventava più caldo, la legge $V*T=costante$ è la sua, e fu trovata e provata con tantissimi esperimenti.

A metà dell'Ottocento si era giunti alla conclusione che il Sole doveva emettere energia per questo tipo di processo.

Solo che a comprimere il suo gas, incandescente, era la sua stessa forza di gravità. Si chiama "contrazione gravitazionale" il processo a cui si attribuiva la produzione dell'energia solare.

La stima che avevano fatto i fisici teorici sul "carburante" a disposizione del Sole era che la sua contrazione sarebbe stata sufficiente per altri 100 milioni di anni a darci luce e calore.

Quindi $1.4/100=0.014$ km/anno=14 metri all'anno, era il ritmo di contrazione del diametro del Sole, che qualunque studente di fisica avrebbe potuto stimare sulla base dei dati termodinamici, forniti, questi ultimi, dal professore!

Ora, generalmente, dei professori ci si fida. Specialmente se hanno i baffi all'insù, la barba bianca e gli occhialetti, come quelli delle Università di oltre 150 anni fa.

Si fidavano tutti, infatti, ma allo stesso tempo si facevano esperimenti per vedere se era vero quello che dicevano...

Se, infatti, il ritmo di contrazione del Sole era di 14 metri all'anno, non era possibile misurarlo con gli strumenti ottici di allora, e anche oggi vale la stessa cosa. Sui 14 chilometri il discorso diventa più probabile, ma ci sarebbero voluti mille anni prima che il Sole si fosse contratto di tanto.

Quindi come inquadriamo il programma scientifico di Auwers, Schur e Ambronn all'Osservatorio di Goettingen? Il diametro del Sole non è qualcosa che è bello di per sé... ma è un valore che se cambia fa cambiare la Fisica... e se non cambia, al più, la conferma.

Termodinamica classica e nucleare

Se alla fine dell'Ottocento dalla misura del diametro solare non ci si poteva aspettare che una variazione di 14 metri all'anno, ciò nonostante si fece di tutto per misurarlo con la massima precisione possibile, che si riteneva essere di +/- 7 chilometri.

Tra il 1891 e la prima metà degli anni trenta ancora un tedesco, Albert Einstein, compie una rivoluzione vera e propria con la Teoria della Relatività (1905-1915) che trova la sua applicazione nella Termodinamica proprio con la sua formula più famosa $E=mc^2$. Negli anni trenta del Novecento la fonte di energia del Sole viene compresa meglio ed è la fusione

nucleare che, a differenza della contrazione gravitazionale, implica una variazione del diametro solare annuale ancora più piccola. A mano a mano che la nuova fisica, quella nucleare, si faceva spazio, prima negli articoli scientifici, poi nelle aule universitarie e poi nelle scuole... la questione sulle variazioni del diametro solare perse di interesse. Le misure di Auwers, se vogliamo, ci davano il suo valore, e la teoria dell'evoluzione stellare ci diceva che non cambiava, se non in miliardi di anni. Nel 1978 un fisico americano, John A. Eddy (1931-2009) riprese in mano la questione del Sole variabile anche dal punto di vista delle sue dimensioni. E lo fece proprio a partire dall'osservazione di un'eclissi, quella del 1567, osservata da Cristoforo Clavio a Roma.¹

Clavio non riporta il luogo di osservazione, probabilmente perché si trattava proprio dove insegnava,² e anche se quel giorno era mercoledì dell'ottava di Pasqua, vacanza per gli studenti di allora, era ragionevole che gli studenti e il professore fossero insieme per l'occasione -unica nella vita, e unica anche per circa sei secoli a venire- di un'eclissi centrale proprio a Roma. Gli studenti, infatti, abitavano nell'Università, visto che erano quasi tutti allievi Gesuiti, e una volta si viaggiava con molta più difficoltà di oggi, quindi avevano trascorso la Pasqua lì.

Clavio ci dice che al momento della totalità -che lui conosceva perché la aveva già vista a Coimbra il 21 agosto 1560- rimase una luce che abbracciava –verbo *amplector* in Latino- tutto il Sole. Eddy interpretò questa frase come se Clavio avesse osservato un'eclissi anulare.

Altri scienziati sostennero che Clavio avesse osservato la corona solare interna, e non la fotosfera, quindi l'eclissi era totale.

¹ J. Eddy, Boornazian e Clavio, *Sky and Telescope* 1980.

² Adiacente a piazza del Collegio Romano, nella sede precedente al 1584.

I meccanici celesti subito si misero ad esaminare le condizioni geometriche di quella eclissi e trovarono -al meglio delle loro possibilità computazionali- che la Luna era ad una distanza tale che l'eclissi poteva essere sia anulare che totale. Era totale dove la Luna era più vicina alla Terra (al meridiano, cioè non lontano da Roma, visto che l'eclissi fu alle 11) e anulare prima e dopo, quando la rotazione terrestre allontanava la superficie della Terra dalla Luna: **si trattava di un'eclissi ibrida.**

Il punto restava questo: Clavio, vedendo un cerchio attorno al Sole, descriveva la fotosfera o la corona solare interna?

Se stava descrivendo la fotosfera il Sole, nel 1567, doveva essere più grande di oggi di 4", cioè -rispetto a 1919.26", $400 \times 7 = 2800$ km più grande.

Questa è la provocazione che Eddy dava al mondo scientifico nel 1978, ed è il motivo per cui io fui chiamato in America nel 2000, per capire se -tramite le eclissi- si poteva raggiungere una misura certa del diametro solare, e quale.

Per il Sole c'è una fisica diversa?

C'è sempre la tendenza a far proprie le certezze di una generazione di scienziati.

Specialmente se (quasi) tutto collima con la teoria vigente.

Eppure i fisici si sono ormai abituati a studiare a fondo un problema non solo teoricamente (a tavolino) ma anche sperimentalmente. Le osservazioni hanno la precedenza e poi sono **i fenomeni che devono essere spiegati dalla teoria.**

I fenomeni sono ciò che noi vediamo e misuriamo, e la teoria è come noi li comprendiamo e capiamo. La teoria è potente perché può prevedere dei fenomeni che non conosciamo ancora, ma può capitare spesso che osserviamo dei fenomeni per cui non esiste ancora una teoria.

Dunque la fisica "utile" non è solo quella sperimentale né solo quella teorica...

C'è da dire che oggi, nel 2023, siamo ad un punto tale della Storia della Fisica che, da una parte siamo consapevoli del progresso esponenziale sperimentato in molti campi, e dall'altra sappiamo che il 95% dell'Universo gravitante ci è sconosciuto. Si tratta sia della Materia Oscura -preconizzata nel 1933- che dell'Energia Oscura, responsabile dell'espansione accelerata dell'Universo, riconosciuta dal 1998. Non sappiamo che fisici hanno né l'una né l'altra, ma sappiamo che ci sono. I fisici sperimentali sono all'opera, quanto i teorici, per "conquistare" questo vastissimo campo della conoscenza.

A scuola e all'università possiamo insegnare come funziona solo il 5% dell'Universo.

Roy Kerr nel 2016 ha detto *"questo è il momento buono per i giovani per lavorare nella Fisica: è ancora tutto da scoprire!"*

E' vero, ed è vero che oggi ci sono molte più risorse rispetto a ieri, anche economiche, investite nel campo della scienza.

Tornando al diametro del Sole, nel 1980 si era ormai aperto un dibattito, prevalentemente in America, che avveniva a colpi di articoli su Nature, Science, Sky and Telescope... sul diametro del Sole variabile.

Eddy, studioso del clima, aveva portato il discorso sulla piccola era glaciale (1645-1715) in Europa come indizi che qualcosa cambiava nella nostra stella su scale temporali più brevi dei miliardi di anni.

Che ci fossero le macchie solari si sapeva bene, e che queste presentassero delle ciclicità pure, ma -allora come oggi- che il Sole potesse influenzare direttamente le variazioni del clima terrestre non era chiaro. L'indicazione che veniva dall'eclissi del 1567 era che -forse- la variazione di diametro solare poteva essere correlata con la **variazione della "costante solare"** ossia l'output energetico del Sole, 1361.1 W/m^2 ³ fuori dall'atmosfera

³ Gueymard, C.A., *Revised composite extraterrestrial spectrum based on recent solar irradiance observations*. Sol. Energy **169**, 434-440 (2018).

e su una superficie perpendicolare ai raggi del Sole.

Sarebbe bastata una variazione di una parte su diecimila per qualche decennio, nella costante solare, per indurre modifiche osservabili nel clima terrestre.

Ma il diametro non può variare se non per un processo che ha luogo nella parte più esterna del Sole, perché la fusione nucleare non dà queste variazioni.

La Fisica galileiana è la stessa ovunque.

La Politica e il Sole

Lo studio dei ghiacciai che avanzavano e regredivano durante i secoli riprese slancio proprio negli anni Ottanta del Novecento. Si era visto, per esempio, che a fine Ottocento alcuni ghiacciai alpini avevano fatto una puntatina verso valle di diversi chilometri, per poi ritornare indietro velocemente. Per altri ghiacciai in altri continenti non era la stessa cosa.

Si pensava anche che il clima si stesse raffreddando, sulla base dell'analisi dei dati planetari allora disponibili.

Poi nel 2000, quando arrivai in America, era in corso la campagna elettorale e i Repubblicani presentavano George W. Bush, mentre i Democratici proponevano Al Gore, al posto di Bill Clinton che aveva completato già due mandati. Al Gore basò la sua campagna elettorale sull'ambientalismo e sulla tesi del riscaldamento globale dovuto all'uomo.

Gore perse le elezioni, ma aveva mosso una macchina troppo grande in cui a temi ecologici giusti, si erano associati interessi economici di parte.

Già in quegli anni, nel gruppo di ricerca di cui facevo parte, si diceva chiaramente che lo studio del diametro solare non avrebbe avuto fondi se l'opinione pubblica avesse ritenuto l'uomo responsabile unico delle variazioni climatiche globali.

Allo stesso tempo si diceva che l'energia⁴ che l'uomo stava

⁴ Tecnicamente la potenza in Watt, cioè energia per unità di tempo.

liberando mediante i carburanti fossili era già pari ad una parte su diecimila di quella che la Terra riceveva dal Sole.

Se il Sole lo si conoscesse perfettamente entro una parte su diecimila, visto che il clima è un equilibrio delicatissimo tra molti fattori, si potrebbe dire che la responsabilità del cambiamento climatico è tutta umana perché gli altri termini restano invariati, ma poiché questa conoscenza non la abbiamo... tutta la colpa all'uomo non la possiamo dare.

Questo dice la ragione, ma nel frattempo l'economia ha preso delle direzioni che hanno inquinato di più il pianeta, con una produzione di rifiuti che è molto maggiore di venti anni fa sia in senso assoluto, che relativo (siamo di più e produciamo ognuno più rifiuti).

La NASA e il diametro solare

Nell'ultimo quarto di secolo la NASA ha investito nella fisica solare, sì, ma nel diametro solare molto poco...

Il progetto SDS dal 1984 prevedeva un prisma davanti all'obiettivo che era costato 100 mila dollari. SDS veniva lanciato periodicamente un pallone stratosferico dal New Mexico, a bordo del quale c'era un telescopio solare che puntava ed osservava in automatico, con cui si misurava il diametro solare usando 5 punti del suo bordo. Il lancio dei palloni aveva anche dei costi, così come le trasferte degli scienziati. L'analisi dei dati era parte del lavoro di routine degli scienziati, ma ha un costo pure quella.

Del cerchio si conoscono solo 5 punti, non la figura completa di cui si deve misurare il diametro.

SDS significa Solar Disk Sextant, dove per Sextant si intendeva uno strumento capace di misurare angoli, l'angolo formato dal disco solare visto da terra, appunto. Davanti ad un telescopio Schmidt-Cassegrain di 20 cm era posto un prisma, proprio come avevano fatto Schur e Ambron a Goettingen nel 1891.

SDS poi volava su un pallone stratosferico a 37 km di quota, in modo da eliminare il grosso delle turbolenze atmosferiche che limitano la precisione delle misure da terra.

SDS ha fatto cinque voli tra il 1992 e il 1998 ed uno nel 2011, dopo un intero ciclo solare.

L'analisi dei dati è durata anni, ed è stata molto dibattuta; anche a me è stato chiesto un contributo, e secondo me restavano ancora dei problemi non risolti, ma è naturale che quando si arriva ad un certo punto conviene ripetere l'esperimento o farne uno nuovo perché non si viene più a capo di tutti i problemi individuati. Il P.I. = Principal Investigator dell'esperimento ha l'ultima voce in capitolo.

Comunque sia sui risultati non ho da eccepire, perché è uno degli esperimenti più accurati che io conosca, sia in termini di operazioni che di analisi dati.

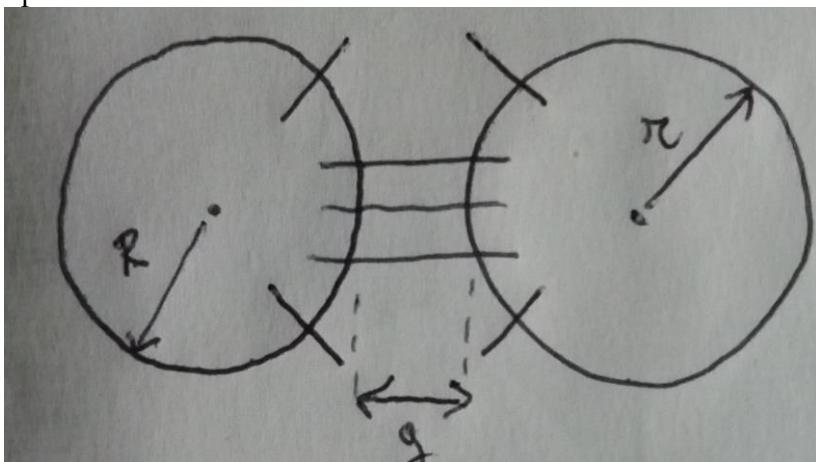


Fig. 1 Schema del rivelatore di SDS, con 7 CCD lineari, per misurare il gap tra le due immagini solari, diretta e prismatica.

Torniamo ai 5 punti con cui si misurava il diametro solare. Erano presi mediante CCD lineari, cioè dei rivelatori da 1280 x 1 pixel, con un filtro monocromatico a 520 nm (giallo). Tecnologia all'avanguardia per il 1984...l'anno del progetto.

Ciò che bisognava localizzare era il bordo del Sole su ognuno di questi rivelatori, e avere così 5 coppie di punti con cui determinare 2 cerchi e -la cosa più importante- la loro distanza, g , che era legata al diametro del Sole. Infatti il prisma posto davanti all'obiettivo del telescopio creava due immagini del Sole separate da un piccolo spazio.

L'angolo primatico $\alpha = \arctan[(2r+g)/f]$ è fisso, g ed r cambiano con la distanza orbitale e con l'eventuale variazione intrinseca del diametro; f è la lunghezza focale del telescopio, fissa.

I centri delle immagini erano, dunque, a distanza fissa, dipendente dall'angolo formato dal prisma da 100 mila dollari, e dalla lunghezza focale e i loro bordi si avvicinavano e si allontanavano tra loro come il diametro angolare cambiava.

SDS era talmente preciso che riusciva a misurare la variazione angolare del Sole dovuta ad una sola ora di orbita ellittica della Terra attorno al Sole.

Proprio nei mesi di aprile e ottobre questa variazione è massima, quasi $6''$ in 10 giorni, cioè $0.6''/\text{giorno}=0.025''/\text{ora}$.

SDS volava proprio in questi mesi.

Riuscii a vedere fisicamente SDS alla NASA nel febbraio del 2001 nel suo hangar.

Il telescopio issato sulla "gondola" che a sua volta, in campo aperto, veniva appesa al pallone stratosferico al momento del lancio. Lo guardavo dal basso verso l'alto.



Fig. 2 SDS in hangar e pronto per il volo il 13 ottobre 2011.

Il pallone pieno è circa 10 volte il volume della gondola cubica, e nella stratosfera, dove la pressione ambientale è 3 mb, diventa sferico e teso.

La mia idea era alla NASA quella di osservare il Sole da terra con SDS per capire i problemi dei dati di quel telescopio.

Fu difficile convincere il mio capo, il grande Sabatino Sofia. Egli insisteva che quel telescopio aveva senso perché lavorasse da sopra la stratosfera e osservare da basso avrebbe solo offerto dati inguardabili per la turbolenza atmosferica, io insisteva che essendo inguardabili quelli di uno dei voli, non si sarebbe perso nulla a tentare a terra: bastava tirare fuori dal garage il telescopio e puntarlo al Sole. Niente da fare, ma il vero impedimento a questo esperimento fu imponderabile...

La gondola, dove il telescopio aveva la possibilità -in cielo- di muoversi e puntare e seguire il Sole, doveva essere abbastanza resistente da sopravvivere all'urto con il suolo, che era sempre molto violento perché il pallone scendeva a terra senza tanti complimenti dopo il compimento della sua missione nella stratosfera. E poi lo si doveva andare a raccogliere nel punto dove era atterrato dopo 8-12 ore di volo. Ciò avveniva nel deserto di White Sands, proprio lo stesso dove il 13 aprile del 1981 lo Shuttle era atterrato dopo la sua prima missione e tutti lo aspettavamo in diretta TV con trepidazione, momenti indimenticabili per me in prima media... si doveva andare a ripescare questo pallone, la gondola che aveva protetto il telescopio con il prisma da 100 mila dollari e i dati registrati dalle CCD lineari.

Era la air base Edwards della US airforce.

Prendeva certe botte questo SDS... che il lavoro di sistemazione dello strumento prima di ogni volo doveva essere bello lungo...tuttavia il famoso prisma da 100 mila dollari era la chiave di tutto l'esperimento: l'angolo formato da quel prisma doveva restare immutabile fino alla fine dei

tempi, sia con il caldo che con il freddo, sia con le botte che con le carezze.

Nella stratosfera la temperatura della poca aria residua può arrivare anche a 100°C sottozero, ma le parti al Sole, viceversa, si possono scaldare al massimo.

Dunque il tutto doveva essere a prova di espansione termica.

Lo stesso concetto doveva valere per il prisma usato da Auwers e messo a punto a Goettingen prima del 1891.

Anche alla meridiana di s. Maria degli Angeli c'è una componente invariante: la posizione e la forma del foro stenopeico. L'espansione termica agisce anche sulle mura spesse due metri e alte oltre venti metri, ma l'assestamento dell'edificio dopo 15 secoli dalla sua costruzione da parte di Diocleziano, era ormai terminato quando Bianchini nel 1701 ha costruito la meridiana.

Da cinque punti a n punti

Trovare il disco del Sole da 5 punti è uno sviluppo del problema che si studia al liceo di trovare il cerchio da 3 punti.

E' laborioso, ma si fa. Siccome tre dei cinque punti di intersezione tra il bordo del Sole e la CCD (fig. 1) sono quasi allineati, si possono calcolare bene centri e raggi solo di tre diversi cerchi; poi si fa la media e la semidispersione ed abbiamo il risultato. Proprio nello stesso modo in cui operiamo in laboratorio.

Di queste misure SDS ne ha fatte una al secondo in ogni volo.

Passando alle eclissi di Sole i punti da cui partire sono ottenuti dall'accensione o dallo spegnimento dei Baily's beads sul fondo delle valli del lembo lunare al momento dell'eclissi.

Nel 1962 Chester B. Watts pubblicò l'atlante dei margini della Luna, realizzato in oltre 18 anni di osservazioni all'Osservatorio Navale degli Stati Uniti d'America.⁵

⁵ [Link](#) all'atlante digitalizzato.

Perché così tanto tempo? Poiché a causa della librazione lunare il lembo, che sta di profilo, sul bordo lunare cambia leggermente, ma continuamente, da un momento all'altro. Sappiamo infatti che la Luna ci mostra la stessa faccia, ma a causa dell'orbita ellittica che ha attorno a noi, vediamo anche un 9% della faccia nascosta nel corso dell'orbita ed il periodo completo di profili e fasi lunari è di 18 anni 10 giorni e 8 ore, ossia il ciclo di Saros. Dunque solo dopo aver fatto foto alla Luna per 18 oltre anni Watts poteva essere sicuro di aver fotografato tutti i possibili orli della Luna.

Tranne due zone vicine ai poli, chiamate zone di Cassini, che non sono mai illuminate dal Sole per noi, ma che si possono scoprire quando, ogni tanto, ci tramonta una stella sopra.

Il fatto che siano state chiamate zone di Cassini significa che Giandomenico Cassini (1625-1712) le aveva già scoperte quando realizzò all'Osservatorio di Parigi, che aveva fondato e dirigeva, la sua mappa lunare.

Ci sono volute le sonde sovietiche Luna e le americane Ranger e Surveyor e per vedere per la prima volta sia la faccia nascosta che le zone di Cassini, ma solo dal 2009 abbiamo proprio tutti i lembi lunari con un metro di precisione grazie al radar laser-altimetro della sonda giapponese Kaguya-Selene. Questi dati hanno aggiornato lo splendido lavoro di Watts dopo oltre cinqant'anni.

La Cina con Chang'e 4 è andata sulla faccia nascosta, mentre un orbiter manteneva il contatto con la Terra. Segno che la Luna è ormai tornata nel mirino di parecchie nazioni.

Il profilo della Luna lo conosciamo ormai bene, almeno altrettanto bene quanto il suo moto.

Siamo arrivati pure a fare Laser-ranging da Terra usando potentissimi Laser riflessi dagli specchi collocati dagli astronauti dal 1969 al 1972, ed ho potuto vedere un paio di queste stazioni a Terra da cui fanno lunar Laser ranging, oltre

che occuparmi degli articoli degli scienziati che li hanno analizzati. Una sera ero all'Osservatorio di Nizza a Calern, 1210 metri sul livello del mare, proprio mentre facevano "Laser-Lune". Prima ancora lo avevo visto in America alla NASA. Infine con i miei studenti ho visto un elemento dello specchio usato dagli astronauti sulla Luna, capace di riflettere indietro un raggio proveniente da qualunque angolazione. Era al dipartimento di Ingegneria Aerospaziale della Sapienza nell'area dell'aeroporto dell'Urbe.⁶

Orbene la Luna durante un'eclissi, specialmente se l'eclissi è ibrida, offre n punti per determinare il disco solare, tanti quanti sono i Baily's beads osservabili.

Le perle di Baily

Dopo il prisma da 100 mila dollari abbiamo ancora a che fare con un tesoro: stavolta sono le perle di Baily.

Francis Baily le scoprì a Pavia nel 1831, assistendo all'eclissi totale di Sole. Durante la fase di totalità descrisse, per primo, l'apparizione di grani o perle di luce che circondavano il disco nero della Luna. Dopo la terminologia semi-tecnica delle eclissi si arricchì con l'*anello di diamante*, che altro non è che l'ultima perla di Baily prima della totalità e la corona interna del Sole dall'altro lato. Durante l'eclissi ibrida ci si può aspettare che non ci sia un anello di diamante, ma una sorta di "*broken annular eclipse*" un'eclissi anulare interrotta in più punti. La parte luminosa della *broken annular* è quella composta da Baily's beads.

Avevo studiato l'eclissi totale-anulare del 1966 sull'Isola di Lesbo il 20 maggio, perché simile –forse- a quella di Clavio.

⁶ Valse la pena di tutto il lungo viaggio in bus e l'attesa su in uno sperduto cavalcavia che mi ricordava una situazione analoga in Virginia, uscito dalla Johns Hopkins University dopo aver ricevuto un passaggio in auto fino ad una fermata dimenticata da Dio e dagli uomini. *Bonanza...* per chi capisce la citazione filmografica *vintage*.

Era una foto in bianco e nero con pochi dettagli.⁷ C'erano tutti i mostri sacri dell'epoca, in particolare: Donald H. Menzel (1901-1976) e Max Waldmeier (1912-2000) rispettivamente di Harvard e di Zurigo (erede di Goettingen). Che fossero già al corrente dell'opportunità di misurare il diametro solare? La questione non era stata ancora aperta.

Nel 1984 ho potuto osservare l'inizio dell'eclissi che si ripeteva dopo un intero ciclo di Saros. Era il 30 maggio al tramonto.⁸ In America l'eclissi fu centrale e si vide il Sole circondato da perle luminose nella sua fase massima.

Nel 2002 ho cercato di ottenere i dati dall'eclissi che seguiva quel Saros, ma nessuno viaggiava in mezzo al Pacifico per pochi Beads e pochi secondi di totalità. Nel 2020, **54 anni e 33 giorni** dopo l'eclissi di Lesvos, un intero ciclo *Exeligmos* era il 21 giugno, e quell'eclissi la ho osservata integralmente dal terrazzo di studio.⁹ Solo che da Roma era parziale, radente.

Nessun grano di Baily poteva essere visto, e la misura del diametro solare presentava altri problemi.

Problemi ritenuti sempre eccessivi da Sabatino Sofia, che mi impedì di osservare l'eclissi di Sole del 25 dicembre 2000, visibile solo dall'America. Per gli Americani, anche se di origine italiana, *Time is Money!*

Avevo lasciato in sospeso il mio tentativo di usare SDS a terra per capirne i problemi sui dati... era Febbraio 2001. Dopo un po' di burocrazia per darmi un ufficio e relative furnitures pure alla NASA sede di Greenbelt Maryland, dove stava SDS e vari personaggi illustri tra cui Fred Espenak, chiamato Mister

⁷ Xavier Jubier ha raccolto tutte le informazioni su questa eclissi alla pagina [qui](#) linkata, che contiene anche la simulazione con il suo software [Maestro](#) <https://www.youtube.com/watch?v=6HdCU0jGiXQ>

⁸ finale di Coppa Campioni all'Olimpico persa ai calci di rigore dalla Roma.

⁹ <https://youtu.be/oCzOVTxT1tk>

Eclipse, una autorità indiscussa in termini di eclissi ed effemeridi, ed alcuni astronauti che avevano calcato il suolo lunare... avevamo fissato l'appuntamento per Settembre.

Martedì 11 al mattino.

Non fu possibile.

Nazione sotto attacco.

Porte chiuse.

Ordini superiori.

Era l'imponderabile.

Sull'altopiano sopra Nizza

A Nizza dal 2007 avevo ripreso in mano il progetto del diametro solare con strumenti basati a terra, per accompagnare una missione da satellite francese: PICARD. Di fatto dal 1975 l'Osservatorio di Nizza nella persona di Francis Laclare (1935-2014) aveva messo a punto l'astrolabio di Danjon per osservazioni solari, addirittura nella versione modificata chiamata DORAYSOL a partire dal 1990. Questa ricerca era svolta in rete con altri Osservatori: quello Reale della Marina Spagnola a san Fernando, uno a Tubitak in Turchia, un altro a Tamanrasset in Algeria –ex colonia francese-, e due in Brasile a Rio e a Sao Paulo, e dopo il periodo di Nizza (2007-2011) fui chiamato a Rio (2012-2014) a portare avanti il lavoro.

Volevo far funzionare DORAYSOL per qualche volta al fine di capire i problemi di dati che avevano fatto arenare la ricerca.

Usare lo strumento. Fare misure. Prendere dati. Toccarlo. Smanettarlo. Infatti Francis Laclare non faceva più osservazioni all'*astrolabe*, da qualche anno.

Tutto era ormai solo analisi dati, per giunta in formati sempre meno intellegibili e reperibili. Il programma era in Pascal, che avevo studiato vent'anni prima... ma non c'era più un computer dove questo programma girasse.

Maledetti sistemi operativi che cambiano in continuazione.

In particolare il computer che stava in Osservatorio a 1200 metri di quota senza un uso continuo... vi potete immaginare che fine ha fatto. Finalmente il 14 ottobre 2008 alle 3 del pomeriggio, dopo una ennesima riunione convinco l'astronomo che mi accompagnava ad aprire la cupola di DORAYSOL e osservare il Sole. L'ultimo transito in almucantarat possibile... poi il Sole andava troppo in basso per essere colto dall'ultimo prisma dell'astrolabio.

Lo vidi, vidi il computer funzionare... come un fantasma... vidi aprire e chiudere il tetto scorrevole dell'*astrolabe*. Fu l'unica volta, neanche mezz'ora. Il 15 ottobre il Sole già non avrebbe raggiunto più l'altezza sufficiente per essere avvistato.

La riunione precedente, era stata fatta per stabilire che tutti gli sforzi dovevano rivolgersi al progetto PICARD-sol, che in francese significa suolo e non Sole, ossia lo strumento nominato PICARD in onore dell'abate astronomo Jean Picard che nel 1680 aveva misurato il meridiano di Francia per conto di Luigi XIV, che si divideva in due parti: un satellite e uno strumento gemello al suolo, quello per cui ero lì. Non si poteva perdere tempo a capire perché un esperimento durato 25 anni dava problemi, bisognava concentrare tutti gli sforzi su quello che stava per andare nello spazio di lì a 2 anni.

Le temps est argent. Time is money in francese.

Così 25 anni di dati stavano per restare senza continuità con quelli dallo spazio. Per fortuna ci fu Rio de Janeiro a riaprire la questione.

Ci tornai il meno possibile sopra l'Osservatorio dove era Picard-sol. I motivi erano due e -di ferro-.¹⁰ Il più ferreo dei due motivi era che tutti i tornanti necessari per arrivare lassù, al Plateau di Calern, a 1200 metri di altezza mi davano il mal di stomaco, sull'altro sorvolo, ma dava pure il mal di stomaco.

¹⁰ come disse il Maggiore nella saga "Lo chiamavano Trinità" di Sergio Leone, con Bud Spencer e Terence Hill.

I fotometri nel prato

Restando a Nizza si potevano incontrare persone importanti. E in quell'occasione il mio capo e direttore del dipartimento Hippolyte Fizeau, Jean Arnaud (+2010), mi presentò Jean-Yves Prado, un pezzo grosso dell'agenzia spaziale francese. Questo scienziato voleva misurare il diametro del Sole con le eclissi usando 10 fotometri da sparpagliare sul territorio dove avveniva la totalità.

Un fotometro vede solo luce, non vede immagini. Vede la somma di tutti i Baily beads, e permette di capire veramente solo quando inizia e finisce la totalità. Due punti. Avendo altri dieci fotometri i punti diventano 20. Così Prado sistemava la questione del bordo solare usando solo 2 beads per volta.¹¹

Non ero molto d'accordo, venivo dalla scuola Americana dove si faceva l'immagine dell'eclissi, sia pure con risoluzione fotometrica molto minore. Alla fine, nel 2015, hanno fatto 4 eclissi tra 0.02 e 0.09 arcsec di precisione. Non male.

10 rivelatori sparsi qua e là senza operatore, e poi analisi dettagliata della curva di luce dell'eclissi. Hanno tenuto conto anche dei miei contributi allo studio delle eclissi, che nel frattempo avevamo pubblicato, ossia l'eclissi del 2006, l'atlante dei Baily beads del 2009 e il nuovo metodo di analisi dei Baily beads del 2012.

L'esperienza di dei fotometri di Prado¹² concludeva che Auwers (1891) doveva essere aggiornato da 959.63" a 959.99" il raggio solare di 0.36" più largo, quindi il diametro di 0.72".

Si deve aggiornare perché quello di prima era sbagliato o perché è cambiato?

Gli autori sono tutti francesi...anche i personaggi ringraziati.

¹¹ Goldstein, autore del libro di meccanica razionale che avevamo all'Università, avrebbe commentato "hanno spaccato una nocciolina con un maglio". Dieci fotometri sparpagliati per la fascia di totalità per predere solo due punti ciascuno.

¹² Lamy, P., et al. Solar Physics **290**, 2617 (2015)

Agli altri, al più, l'onore delle citazioni. Ed è l'articolo dove sono citato più volte, bene! Li ringrazio anche io.

Le immagini ghost verdi

In un video di un'eclissi ibrida con delle immagini ghost, anche piccole, si possono cogliere molti beads. Basta un solo video, anche VGA cioè a bassa risoluzione.

Mentre i fotometri ne colgono solo due, con una ripresa video rivolta verso il Sole e zoom 4x ISO 100 EV=-2 fatto con uno smartphone, che pure in Timor Est ormai hanno tutti, basta geolocalizzarlo e il gioco è fatto.

Ho le prove. Il 14 aprile ho realizzato la simulazione di un'eclissi ibrida realizzando un video nei tempi e nei modi di come si verificherà laggiù a Timor Est il 20 aprile.

A Piazza san Pietro ho aspettato il transito meridiano del Sole all'Obelisco Vaticano individuando il posto dove il Sole passava esattamente al centro della stella tridimensionale sopra l'obelisco. Nel video, dalla ghost image, si notano 8 beads, quattro prima e quattro dopo, due dei quali restano accesi durante la fase di totalità. Si tratta di una simulazione molto realistica dell'eclissi anulare interrotta, *broken annular*.

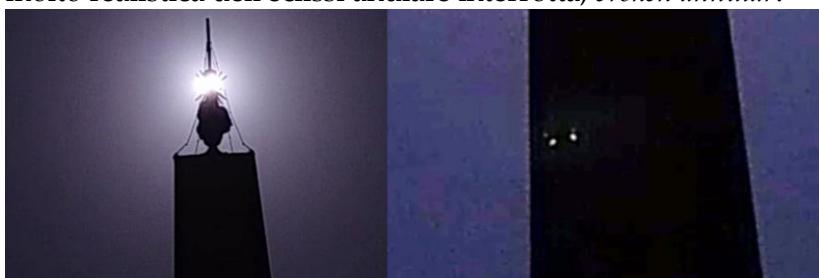


Fig. 3 Il Sole dietro l'obelisco Vaticano il 14 aprile, immagine diretta (dx) sovraesposta e ghost image (sx) dove si vedono 4 beads. ISO 100, EV=-2. Fotogramma VGA 640x480. FPS 1/30 s.¹³

¹³ Video del fenomeno: <https://youtu.be/0DOfl3QAe2I> (14 apr 2023) con spiegazioni tecniche nelle specifiche del video.

Mentre la totalità vera e propria, dove normalmente la gente si reca per sperimentare l'eclissi, è buio anche nell'immagine diretta, anche un singolo Baily bead riluce tanto da abbagliare la telecamera (e anche l'occhio) per cui la ghost image aiuta a vedere cosa sta succedendo mentre l'immagine diretta risulta ancora troppo sovraesposta. I singoli frame del video, formato **VGA, 640x480 pixel**, mostrano una **ghost image del Sole di 22 pixel di diametro**. La circonferenza $\pi D=69$ pixel=360°, ha un pixel ogni 5°, meglio del fotometro senza risoluzione spaziale. La risoluzione fotometrica in VGA mostra intensità della ghost image tra 2 e 90 ADU (unità tra 0 e 255, bianco saturo).

A causa del trattamento antiriflesso delle lenti della fotocamera la ghost image è verde, quindi vicina allo standard monocromatico di 540 nm considerato per il continuum solare, e utilizzato da Prado e compagni per le 4 eclissi della prima metà dello scorso decennio, e al filtro SDS di 520 nm.

Con dei video dell'eclissi fatti da posti abbastanza diversi tra loro possiamo aspettarci lo stesso numero di beads analizzati da Prado e compagni su 4 eclissi... ecco perché incoraggio le osservazioni con la *ghost image* della prossima eclissi ibrida.

La risoluzione temporale è 0.03 secondi sull'On/Off e c'è una discreta modulazione di intensità 0-90 ADU. ¹⁴Per l'eclissi solare con una tipica velocità relativa di 0.335"/s corrisponde ad un'accuratezza di 0.01". N punti con 10 milliarcsecondi di precisione ognuno, separati, e distinti, grazie alla ghost image. La ricerca della ghost image è un gioco da ragazzi, è presente in tutte le fotocamere, perché dovuta a riflessioni interne quando gli elementi ottici sono almeno due.

Il vetro protettivo delle fotocamere è un elemento ottico, anche se è piano e sottile, perché riflette l'immagine che a sua volta il rivestimento rivestito con un film ottico antiriflesso rimanda

¹⁴ anche se il rischio di aggiustamenti automatici non è mai del tutto eliminato dalla modalità "pro" del video, che dovrebbe essere "manuale".

verso l'esterno. Proprio questa immagine verdolina è la ghost image del Sole, che è la sorgente luminosa più forte che possiamo riprendere.

La *ghost image del Sole* ha cinque proprietà:

- 1- è molto più debole dell'immagine diretta
- 2- è quasi a fuoco¹⁵ e mostra il diametro angolare reale del Sole
- 3- si trova dalla parte opposta al Sole rispetto al centro ottico
- 4- è speculare al vero (sotto - sopra e Ovest - Est invertiti)
- 5- l'immagine è verde,¹⁶ come il picco dell'emissione del continuo solare a 540 nm.

Si vede meglio quando è proiettata su uno sfondo scuro, altrimenti sfugge all'attenzione. Per riprendere un'eclissi occorre fare un po' di pratica con la ghost image del proprio smartphone. Durante il video il telefonino è fermo, e la cover bianca serve per non scaldarlo troppo al Sole.



Fig. 4 Eclissi parziale del 25 ottobre '22 a Roma h 11:46 (ghost).

Dinamica fotometrica della ghost image

L'intensità della ghost image¹⁷ arriva attorno a 100 adu, il bead

¹⁵ In pieno Sole appare un'altra ghost image blu, sfuocata e più debole.

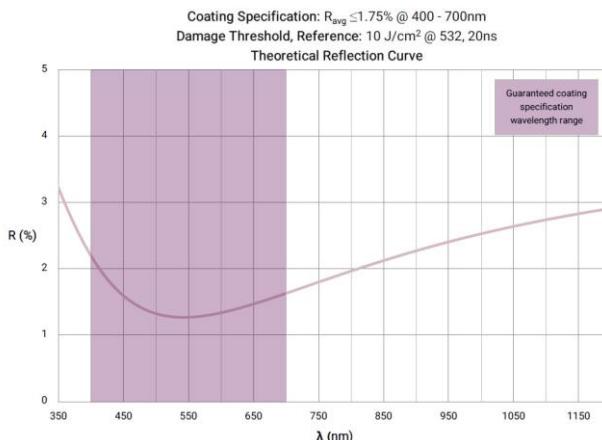
¹⁶ Donald C. Dilworth, *Introduction to Optics and Lens Design- part II: Ghost images* <https://www.youtube.com/watch?v=zUPe6LJObCg> 2017

¹⁷ Si chiama anche *immagine catadiottrica* o, in breve, la *catadiottrica* <http://www.funsci.it/files/catadiottriche.pdf> di Giovanni Pietro Sini autore del testo Problemi di Microscopia Ottica Bologna (2007).

più debole vale circa 2 adu (fig.3). Se il bead è ancora abbagliante (255 adu) nell'immagine diretta significa che a 2 adu di ghost corrispondono **almeno** 255 adu di immagine diretta: un rapporto 1:100. Ciò significa che le 100 adu a 100 ISO fissi nella ghost image del Sole corrisponderebbero (se il rivelatore fosse lineare) a $100 \times 100 = 10000$ adu dell'immagine diretta. Così la dinamica fino a 255 adu (8 bit, $2^8 = 256$ livelli), grazie alla ghost image supera i 12 bit (4096 livelli).

Per questa ragione l'eclissi può essere seguita agevolmente nelle fasi di parzialità tramite la ghost image, e quando si avvicina la totalità, la ghost image si affievolisce e scompare e l'immagine diretta permette di seguire lo spegnimento degli ultimi beads. Il moltiplicatore $\sim 10^2$ tra la ghost e l'immagine diretta dipende dalla riflettanza dei vetri delle ottiche (almeno due, quello di protezione e quello della lente dell'obiettivo fotografico, che danno una sola ghost image).

MgF₂ Coating Curve



© Edmund Optics Inc. All rights reserved.

Fig. 5 Il trattamento antiriflesso¹⁸ $\lambda/4$ MgF₂@550 nm è il più

¹⁸ Kristina Kaszei, *What are ghost images*, Edmund Optics Inc.
<https://www.youtube.com/watch?v=nulkgcYHfZ4> (2022)

usato¹⁹ per la luce visibile, trasmette meglio il verde a 550 nm. Alla lunghezza d'onda 550 nm si ha la minima riflettanza pari a 1.35%. Il vetro protettivo ha trasmittanza attorno all'80%, la lente trattata con Fluoruro di Magnesio riflette 1.35% della luce che rientra come ghost dopo la seconda riflessione sul vetro nella parte interna. Il rapporto tra le luminosità Ghost=G e Diretta=D è $IG/ID=1/370$.²⁰ La trasmittanza massima è nel verde, dove è anche massima l'emissione del Sole, quindi abbiamo la *ghost image* verde, quasi come le specifiche dei filtri di SDS e dei fotometri.

Conclusioni Il diametro solare ufficialmente non cambia, ma le misure non concordano, a meno che non debbano farlo per forza. Jean Pierre Rozelot, altro astronomo di Nizza-Grasse, ha studiato le misure dello schiacciamento polare del Sole (oblateness) da Dicke (1967) in poi usando anche il telescopio di Pic du Midi (2877 m) e ha raggiunto i millisecondi d'arco.

Marcelo Emilio ha munto i dati di SOHO, satellite ESA-NASA mostrandoci che il diametro non è variato entro 15 km. SOHO ha immagini con 4096 pixel, cioè 0.5" sul Sole. Il lavoro per scendere a 0.01" è puro equilibrismo, ma Emilio ha usato il timing del transito di Mercurio del 2003, un virtuosismo. La questione sulle variazioni del diametro non è affatto chiusa, almeno entro 0.1", ma pure tre volte tanto. L'eclissi ibrida del 20 aprile 2023 può offrirci molti altri dati utili per ottenere questa misurazione del valore attuale del diametro solare.²¹

La possibilità di fare video con lo smartphone e di studiare la

¹⁹ <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/lasers/anti-reflection-coatings/>

²⁰ La luce riflessa che arriva all'obiettivo dipende dalla sua riflettanza $Ro=0.0135$ e dalla riflettanza del vetro $Rv=0.1 \div 0.2$. La luminosità dell'immagine ghost di primo ordine è $1/RvRo=370 \div 740$. La ghost image è più debole dell'immagine diretta $IG/ID=370 \div 740$ volte.

²¹ Sigismonti e Raponi, <https://www.astronomerstelegram.org/?read=15991>

curva di luce dei Baily's beads grazie al moltiplicatore che c'è tra l'immagine diretta e la ghost image, dell'ordine di 300, fa sì che i 255 livelli di intensità di un pixel di una normale immagine jpg, passino ad un valore ben superiore a 10000 con la visibilità della ghost image. Il detector della fotocamera, non è lineare e per l'astronomia richiede opportune calibrazioni. La fase centrale della totalità è visibile con l'immagine diretta, mentre quelle parziali precedenti, abbaglianti per l'immagine diretta, sono accessibili con la ghost image verde.

È necessario prendere confidenza con la ripresa della ghost image, ossia trovare dove si trova rispetto al Sole in modo da averla nel video dell'eclissi sempre nel campo. È importante cercare subito la ghost image: a 4x si trova vicino al centro dell'immagine; senza zoom è più facile perdere la ghost image; il Sole quindi deve stare poco ($<5^\circ$) fuori asse. Lo zoom 4x dà un buon video, con ISO 100 EV=-2 e 30 fps, VGA, 640x480.

Con le nubi e cambi continui di luminosità i beads si vedono comunque,²² ma prima e dopo la totalità risaltano meglio.²³

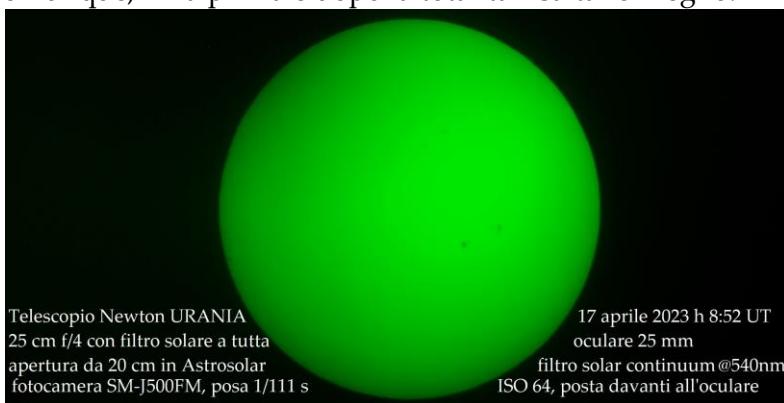


Fig. 6 La presenza di facole al lembo, come presso la macchia AR3280 a W, può alterare la curva di luce dei Baily's beads.

²² C. Sigismondi (2023) https://youtu.be/3V0dHq2B_oE 16 aprile '23 all'Obelisco Vaticano. Con spiegazioni in Inglese delle varie tecniche.

²³ Prosaica, ma efficace la totalità simulata https://youtu.be/wcMh3_n-pmM

Fotometria dell'eclissi lunare di penombra 5 maggio '23

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma)

Submitted May 6th 2023, revised and accepted May 8th

Abstract The penumbral lunar eclipse offers the possibility to do differential photometry to assess the progression of the penumbral limits. Here we describe the eclipse of May 5, 2023 as seen from Rome, by analyzing 5 images of the Moon from the Moonrise to the end of the eclipse one hour after. The crater Tycho, already out the penumbra at moonrise, has been compared with Mare Serenitatis, Mare Frigoris (the last to exit the penumbra) and Mare Nubium (already out of the penumbra at Moonrise). The luminosity ratio starts from an excess with the penumbra still covering M. Serenitatis and Frigoris, while it remains constant for M. Nubium. The measures have been made with a 7x18 monocular and smartphone camera, the analysis with Iris 5.59 software.

Sommario è difficile osservare le fasi di un'eclissi penombrale, poiché la Luna non è un disco uniforme e piatto. Nell'eclissi del 5 maggio 2023, la Luna è sorta già nella fase finale della penombra, distribuita nell'area più scura dell'emisfero Nord, che contiene i Mari e l'Oceano delle Tempeste. Per rilevare il passaggio dalla penombra alla piena luce si è misurato il rapporto tra le luminosità dell'area attorno al Cratere Tycho e quelle del centro di Mare Serenitatis, della sezione più scura di Mare Frigoris, e del centro di Mare Nubium, quest'ultimo già fuori della penombra, come Tycho, al sorgere della Luna. L'effetto è statisticamente significativo e si riesce a vedere.

Keywords: Moon: eclipse, Penumbral eclipses, Photometry.

Introduzione: la Luna e l'albedo

La superficie lunare non ha riflettanza costante, superfici più vecchie sono più scure, e le più giovani, "recentemente" vetrificate appaiono più brillanti. Anche l'angolo di vista rispetto alla superficie modifica la riflettanza, e l'orlo lunare tende ad essere più brillante delle regioni circostanti. Così all'ultimo quarto la vasta area scura dell'Oceanus Procellarum è contornata da un orlo decisamente brillante, senza che la sua "terra" sia molto meglio riflettente del basalto dell'Oceano. La distribuzione dei *Maria* che ci presenta le tipiche macchie lunari, fa sì anche che l'emisfero Nord della Luna sia più scuro di quello meridionale. Visto che l'eclissi del 5 maggio 2023 terminava proprio nell'emisfero Nord, abbiamo usato un

metodo fotometrico per metterne in evidenza l'evoluzione. A occhio nudo, usando due paia di occhiali da Sole, ho potuto notare una zona più scura al bordo, "a ore 10" come riportato nel video delle 21:18, confrontando con le effemeridi si vede una differenza di 30° nell'angolo di posizione corrispondente al massimo dell'eclissi in quel momento. Anche la riflessione su vetro è stata sperimentata e ha mostrato meno luce nell'emisfero in penombra.



Fig. 1 Effemeridi dell'osservazione fatta indossando 2 paia di occhiali da Sole, e confronto con il dato osservativo.



Fig. 2 Immagini riflesse su un doppio vetro (ribaltate destra-sinistra) e effemeridi: metà Luna a sinistra appare più scura. Entrambi gli esperimenti hanno dato risultati soddisfacenti, ma la coincidenza delle zone scure con la penombra richiedeva una prova più convincente. Ho quindi preso immagini della Luna più dettagliate possibile, senza

saturazione, così da analizzarle in modo differenziale.

20:31:20 ISO 100 2/100 s (Luna rossa, estinzione atmosferica)

20:51:47 ISO 80 1/100 s

21:09:20 ISO 100 1/100 s

21:26:33 ISO 64 1/100 s

21:31:18 ISO 80 1/100 s (91.3 minuti dopo le ore 20).

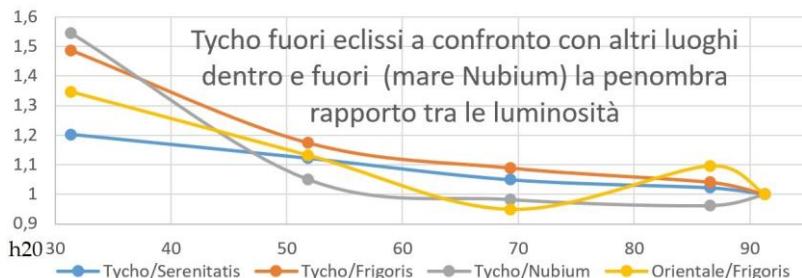


Fig. 3 Rapporti tra la luminosità di Tycho e altri luoghi lunari.

Tutte le curve riportate in figura sono normalizzate al valore a eclissi finita (92 minuti dopo le ore 20). Si vede che il “gruppo di controllo”¹ costituito dal Mare Nubium, fuori dall’eclissi come Tycho, vale 1 dalle 8:52, partendo da uno strano 1.54.²



Fig. 4 La Luna alle 20:31:20. Schiacciamento da rifrazione 0.936
L’immagine di sinistra è visualizzata tra 100 e 220, per evidenziare il gradiente di luminosità laterale.

¹ In medicina, testando una nuova terapia, il gruppo di controllo prende un “placebo” o beve acqua fresca inconsapevolmente.

² Essendo l’immagine tutta rossa e la matrice RGB più sbilanciata verso i pixel G, questo effetto è dovuto al colore dell’immagine.

Il gradiente di luminosità, pur nascosto dalla presenza, a sinistra, dei mari, è evidente aumentando il contrasto dell'immagine.

Mentre il “campione statistico” delle zone in penombra (Mare Serenitatis e Mare Frigoris, anche confrontato con Mare Orientale, pure fuori eclissi) cala come ci si aspetta.³



Fig. 5 La Luna alle 20:51:47



Fig. 6 La Luna alle 21:09:20

L'operazione di aumento di contrasto consiste nel limitare per tutte le immagini il range tra 100 e 220. Questo riduce all'oscurità completa i mari più scuri, e fa risaltare bene le aree brillanti di Tycho e Aristarchus, anche con immagini sfuocate.

³ In realtà Mare Orientalis ha una salita alle 21:27, ma la consideriamo fluttazione statistica.



Fig. 7 La Luna alle 21:26:33 del 5 maggio 2023

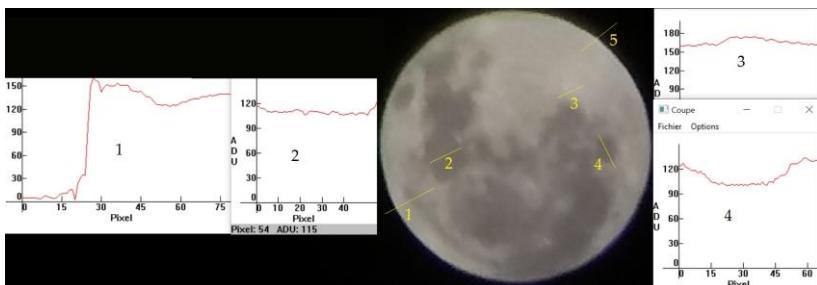


Fig. 8 La Luna alle 21:31:18 del 5 maggio 2023 al termine dell'eclissi: 1 corrisponde alla sezione fatta del mare Frigoris, 2 alla sezione di mare Serenitatis, 3 all'area brillante di Tycho, 4 alla sezione di mare Nubium. I conteggi indicati negli istogrammi corrispondenti, sono quelli dati dal canale G di RGB e sono stati quelli considerati per ottenere il grafico in figura 3. Mare Orientale è il bordo in alto a ore 2.

Conclusioni

Nonostante la difficoltà di distinguere la penombra da eclissi, dove il Sole è parzialmente occultato dalla Terra sopra la superficie lunare, abbiamo dimostrato che la fotometria differenziale in banda V (canale G della matrice RGB) mette in evidenza l'eclissi. La fotometria relativa la si è ottenuta rispetto alle aree di Tycho, Mare Nubium e Mare Orientale, fuori eclissi sin dal sorgere della Luna, e Mare Frigoris e Mare Serenitatis.



Fig. 9 Levata della Luna a Pescara ore 20:15-20:17 con la magnitudine dell'eclissi ancora a -0.24, cioè il 24% del diametro, lungo la direzione centro della Luna-centro dell'ombra della Terra, è fuori dalla penombra.



Fig. 10 Sorgere della Luna alle 20:21:46 e alle 20:28:07 a Roma. Si vede chiaramente il gradiente negativo da destra a sinistra. A Roma la magnitudine dell'eclissi è iniziata già a -0.29.

Referenze

C. Sigismondi, Gerbertus 10, 39 (2016)

C. Sigismondi, Gerbertus 12, 75 (2019)

Effemeridi eclissi di penombra 5 maggio 2023:

<https://www.timeanddate.com/eclipse/lunar/2023-may-5>

Video eclissi di penombra: C. Sigismondi (2023)

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLJaer2KV49286StRdiOveH5luBGrPIOht>

Vulcano in Sole visus? Storia dell'ultimo transito sul Sole

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma)

Submitted May 14th 2023, revised and accepted May 17th

Abstract The transit of the famous intra-mercurial planet Vulcan over the Sun should obey to classical Newtonian gravity. An object passed across the Sun on May 12, 2023 at 7:28 UT has been observed in projection. The dimension like a big sunspot, and its angular velocity, covering its diameter in a few seconds, ruled out the orbital hypothesis, either around the Sun and around the Earth. It could have been a stratospheric or atmospheric balloon. The keplerian velocity around the Sun or around the Earth in circular orbits has been used to eliminate the orbiting hypothesis. A short historical excursus on Vulcan hypothesis and vulcanoids observations is presented.

Sommario Il transito di Vulcano, il mitico pianeta intra-mercuriale, sul Sole sarebbe soggetto alle equazioni di Newton, e un oggetto osservato davanti al Sole alle 7:28 UT del 12 maggio 2023 è stato passato al vaglio di tre ipotesi: orbita attorno al Sole, alla Terra, e volo in atmosfera-stratosfera.

L'ultima ipotesi è l'unica a reggere, a meno di violare le leggi della Fisica.

Keywords: Vulcan, Intra-Mercurial planet, Keplerian angular velocity.

Introduzione: Alle 9:28 del 12 maggio 2023 un oggetto sul Sole delle dimensioni angolari di una grossa macchia, 1' di diametro, e con simile contrasto, si muoveva approssimativamente dall'alto verso il basso. La velocità angolare era attorno a 0.3'/s. Subito dopo una nuvola ha coperto il Sole, che è riapparso dopo 5 minuti, senza più quell'oggetto. I testimoni oculari dell'ultima osservazione del transito del mitico pianeta Vulcano sono ancora tra noi, al momento di vergare righe. Una iscrizione è stata posta sul luogo dell'osservazione ad imperitura memoria.

Cosa abbiamo visto: L'oggetto è "comparso" vicino alle macchie AR 13296 e AR 13297, dopo altri periodi di intermittenza nubi-Sole. L'osservazione è stata fatta in proiezione con il telescopio da 46 mm delle Officine Galileo di Firenze in montatura altazimutale (un teodolite).

Dobbiamo capire se era un *vulcanoide* (Steffl, et al., 2010).¹

¹ Precedenti: in [Vulcan \(hypothetical planet\) - Wikipedia](#) sono menzionati presunti transiti sul Sole il 29 gennaio 1860, l'8 maggio 1865, nel 1862...

VULCANUS IN SOLE VISUS

Die XII mense Maii A.D.I. MMXXIII Romæ, projectato Sole cum perspicillo duarum unciarum, Vulcanus in Sole apparuit XXVIII minutos post hora tertia, aestivu modo, nubilo tempore. Vulcanus sicut grandes maculas occidentalis limbi, * triangulo facente, lento moto ad superiorem partem Solis movebat, velocitate inferiore unius minuti per secundo temporis. Adstabant studentes Marianna, Samuel et Johannes Lycæi Galilæi Ferraris. Ob nubilo, imago Solis abscondita iterum fuit per quinques minutos et numquam Vulcanus visus fuit. Physicæ professor Constantinus posuit futuræ memoriæ

Fig. 1 Iscrizione latina commemorativa del transito di Vulcano sul Sole del 12 maggio 2023.

Tre ipotesi: 1 oggetto in orbita solare 2 in orbita terrestre; 3 oggetto in volo.

1) pianeta (intramerkuriale), cioè il famoso Vulcano, oggetto di ben due teorie gravitazionali, molti avvistamenti, ma nessuna conferma. Come l'Atlantide.

2) satellite artificiale della Terra

3) pallone aerostatico

Oggetto in orbita

Per le ipotesi orbitali 1 e 2 dobbiamo fare riferimento alla teoria di Newton, secondo cui la velocità orbitale determinata dalla massa centrale varia con la distanza da essa come $v=1/\sqrt{r}$. Le leggi di Newton dicono:

1) per il Sole $v=30/\sqrt{r}$ con r misurato in unità astronomiche =150 milioni km dal centro del Sole e v misurata in km/s.

2) per la Terra $v=1/\sqrt{R}$ ($R/60$) con R misurato in raggi terrestri =6400 km e v misurata in km/s.

La geometria dice che la **velocità angolare** espressa in gradi al secondo è $\omega = d/60R/t$

con d distanza percorsa dall'oggetto in movimento,

perpendicolarmente alla linea di vista, R è la distanza di esso da noi, e t è il tempo [s] intercorso.

In base a tutto ciò sapendo anche che in gradi $\omega=v/60R$ dobbiamo trovare quali valori di v ed R sono plausibili per quanto abbiamo osservato.

Le formule 1) e 2) sono la stessa legge fisica, ma ho usato due "r" diverse per ricordarci che la velocità angolare dipende dalla distanza da cui noi la vediamo R.

Cominciamo dall'**orbita intorno al Sole**.

Le equazioni da risolvere sono dunque

$$\omega=30/v(r)/60R=0.3/60 \text{ ed } R=150 \text{ milioni di km} \cdot (1-r).$$

con r distanza dal Sole -in unità di 150 milioni di km- e R distanza da noi. Due equazioni e due incognite.

Si può risolvere. Sviluppiamo l'equazione e otteniamo
 $6.7 \cdot 10^{-8} = z(1-z^2) = z - z^3$ con $z=v(r)$

Ho usato un cambio di variabile per isolare la radice e mi sono trovato davanti ad un'**equazione di terzo grado**.

Dovremmo risolverla in modo grafico, ma vediamo prima se è il caso. Passiamo alla seconda equazione, quella di orbita attorno alla Terra.

$$\omega=1/v(R/60R)/60/(R-1)=0.3/60$$

qui vediamo che l'incognita è una sola, R, la distanza dal centro della Terra. $(R-1)$ lo dobbiamo mettere perché noi non siamo nel centro della Terra, ma sulla sua superficie, ad un raggio terrestre dal centro di tutte le gravità.

$$0.3R^3 - 0.6R^2 + 0.3R - 1 = 0. \text{ Altra equazione cubica.}$$

Le Verrier, le anomalie dell'orbita di Mercurio e Einstein

Adesso capiamo perché Urbain-Joseph Le Verrier ha dedicato tutta la sua vita a calcolare le orbite dei pianeti.

Fu gratificato enormemente nel 1846 quando scoprì Nettuno a tavolino, cioè risolvendo equazioni su equazioni, ma quando nel 1859 annunciò che ci doveva essere anche un pianeta

dentro l'orbita di Mercurio, che fu subito chiamato Vulcano... iniziò una ricerca appassionata con gente che intraprendeva viaggi avventurosi per assistere alle eclissi di Sole, al fine di vedere la tenue luce di questo pianeta apparire tra le maglie della diafana corona solare.

Ci volle Einstein, nel 1915, dopo oltre 10 anni di calcoli sui dati raccolti da Le Verrier, che spiegò che Vulcano non serviva più a spiegare le anomalie dell'orbita di Mercurio, bastava sapere come il campo gravitazionale del Sole curvava lo spaziotempo. Vulcano fu cercato per un altro decennio, ma poi i fisici cominciarono a capire la Teoria della Relatività e a verificarla con varie osservazioni, tra cui quella dell'eclissi di Sole del 29 maggio 1919, che dimostrò come il campo gravitazionale del Sole piega la luce delle stelle che gli stanno dietro. Vulcano non c'era mai all'appello.

Prima di intraprendere la soluzione delle complicate equazioni di terzo grado, che sono state risolte da Gerolamo Cardano² nel cinquecento, vediamo un procedimento geometrico, quello che abbiamo provato ad imbastire mentre ancora l'osservazione era in corso, e poi abbiamo discusso nel resto della giornata.

Schema geometrico

Se l'oggetto fosse in orbita proprio sopra la superficie del Sole la sua velocità sarebbe di $0.3/32$ volte 1.5 milioni di km/s, cioè circa 14 mila km/s. Una tale velocità sarebbe **relativistica**, ossia $1/20$ della velocità della luce, che è il limite in Fisica. Anche per il campo gravitazionale del Sole, occorrerebbe un oggetto molto più piccolo del Sole, una nana bianca, per esempio, per dare luogo a queste velocità orbitali. Non è un valore ragionevole. Allora dobbiamo spostarci verso di noi,

² La storia è molto più complessa e riguarda anche Tartaglia, Scipione del Ferro e l'altare di Apollo. [Equazione di terzo grado - Wikipedia](#)

avvicinando l'oggetto alla Terra finché a quella velocità angolare non corrisponda una velocità in km/s ragionevole.

Se ci mettiamo a metà della distanza Terra Sole, sono sufficienti 7000 km/s per mostrarcì lo stesso effetto, ma sono sempre troppi. Allora ci mettiamo ad 1/1000 della distanza Terra-Sole e troviamo 14 km/s. Siamo passati da 150 milioni di km da noi a 150 mila km da noi. Questa distanza è poco meno della metà della distanza Terra-Luna. Là non c'è niente, perché le sonde e le navicelle che sono andate sulla Luna sono ancora poche, e comunque non resta nulla in quell'orbita.

Per una velocità orbitale attorno alla Terra 14 km/s sono comunque tanti, a meno che non si tratti di un meteoroide, ossia un asteroide con un'orbita inclinata rispetto a quella della Terra.

Scendiamo ancora di un fattore 5, e arriviamo a 30 mila km da noi, dove sono i satelliti geostazionari.

La loro velocità dovrebbe essere 2.8 km/s, ma non è più una velocità orbitale determinata dal Sole, a meno che non sia in orbita "con la Terra" che già va a 30 km/s.

Noi dalla Terra lo vediamo viaggiare a 2.8 km/s, sta a 30 mila km da noi, ma su un'orbita attorno al Sole.

Quando dovrebbe essere grosso se appare di 1' d'arco?

sarebbero 1/60 di 1/60 della distanza, che se è 30 mila km, dà una dimensione di 8.3 km.

Credo che tutti i giornali ne avrebbero parlato già da anni...come il Doomsday Asteroid, l'Asteroid del Giorno del Giudizio! Peggio ancora se fosse a 5 volte questa distanza, sarebbe 5 volte più grande. Se facciamo lo stesso ragionamento per un satellite in orbita alla Terra sappiamo che la Stazione Spaziale Internazionale gira a 7 km/s a 400 km dalla superficie terrestre, così da fare un intero giro del Mondo in 90 minuti.³

³ [ISS Transit Finder \(transit-finder.com\)](http://ISS Transit Finder (transit-finder.com)) dà due passaggi di Tiangong vicino al Sole il 12 maggio alle 16:10 e alle 17:46. Ben lontani dalle 9:28.

La sua velocità angolare massima (se ci passasse allo zenit) è $\omega=v/R=7$ km/s/400 km=0.0175 radianti al secondo, cioè circa $1^\circ/s$. A 35° di altezza sopra l'orizzonte questo valore, per l'effetto di proiezione lungo la linea di vista, scende a circa la metà. Noi abbiamo osservato qualcosa di molto più lento, circa 100 volte più lento.

Ma per essere così lento, e in orbita, deve essere 100 volte più lontano della Stazione Spaziale...e anche 100 volte più grosso, perché $1'$ alla distanza della Stazione Spaziale è $1/60/60$ di questa distanza, cioè 111 metri, un campo da calcio, mentre 100 volte più lontano è più di tutta villa Pamphili...10 km.

Quindi lasciamo alla matematica pura, oppure alle tecniche di analisi numerica, la soluzione delle due equazioni di terzo grado, perché ci sembra che l'oggetto che abbiamo osservato non sia né della corte del Sole, né di quella del pianeta Terra.

Per via della sua velocità e delle sue dimensioni.

Ma allora che cos'era?

Ipotesi 3. Pallone aerostatico.

Noi l'abbiamo visto muoversi verso l'alto, ma poteva benissimo essere in movimento dall'Est verso l'Ovest geografico.

Un pallone che era trasportato dal vento, rilasciato a Pescara, o in Cina (con tanto di telecamere spia).

La velocità angolare è sempre quella $0.3'/s$, perché rispetto al Sole che è $32'$ di diametro avrebbe impiegato circa 2 minuti ad attraversarlo.

La distanza stavolta la chiamiamo $h/\sin(\alpha)$ con $\alpha=38^\circ$ che era l'altezza del Sole sopra l'orizzonte in quel momento.

$$\omega=v/h/\sin(38^\circ)=0.3'/s$$

un pallone deve stare nell'atmosfera

e quindi lo mettiamo tra 400 m (lanciato da un ragazzino) a 4000 m (pallone sonda meteorologico) a 40000 metri (limite della stratosfera, lanciato da una nazione con alta tecnologia)

Solo il primo caso non richiede autorizzazione, il resto è tutto sotto il controllo delle autorità aeronautiche e militari.

anche qui abbiamo dunque tre ipotesi

3.1 palloncino $\omega=v/650=0.3'/s=8.3 \cdot 10^{-5}$

3.2 sonda meteo $\omega=v/6500=8.3 \cdot 10^{-5}$

3.3 stratosfera $\omega=v/65000=8.3 \cdot 10^{-5}$

si vede che è la stessa equazione, la velocità angolare resta costante, la velocità diventa ogni volta 10 volte più grande:

3.1 $v=5.4 \text{ cm/s}$

3.2 $v=54 \text{ cm/s}$

3.3 $v=5.4 \text{ m/s}$

Adesso vediamo quanto è grosso l'oggetto, perché deve essere grande 1' ossia 1/60 di 1/60 della distanza $h/\text{sen}(38^\circ)$.

3.1 $h/\text{sen}(38^\circ)=650 \text{ m}$, dimensione 18 cm.

3.2 $h/\text{sen}(38^\circ)=6500 \text{ m}$, dimensione 1.8 m.

3.3 $h/\text{sen}(38^\circ)=65000 \text{ m}$, dimensione 18 m.

Discussione sulla soluzione "oggetto in volo":

Un palloncino ha un diametro di 18 cm.

Un pallone sonda è ragionevole che sia di 1.8 metri.

La sonda cinese stratosferica recentemente abbattuta sui cieli Americani è grande anche più di 18 metri,⁴ anche quella americana, che è lanciata attorno all'Antartide con un telescopio a bordo, superBIT,⁵ e attualmente in volo.

E' più facile, in atmosfera, che un oggetto sia trasportato in orizzontale dai venti, che cambi di quota. Perché è faticoso lavorare contro la forza di gravità.

Le velocità quindi potrebbero essere orizzontali, i venti da Est verso Ovest, e la reale velocità essere almeno due volte più veloce di quella "proiettata" lungo la nostra linea di vista a 38° di altezza.

⁴ [2023 Chinese balloon incident - Wikipedia](#)

⁵ [Super-pressure Balloon-borne Imaging Telescope - Wikipedia](#) avvistato il 7 maggio scorso in Cile [Spaceweather.com May 7 2023](#).

Conclusioni: se è un palloncino andava a 10 cm/s: pochissimo vento, se è una sonda andava a 1 m al secondo alla quota del Monte Bianco... mi pare ancora poco, se è un pallone stratosferico andava a 10 m/s, che è pure abbastanza poco, ma nella stratosfera i venti spingono molto lentamente i palloni, che fanno un giro di 10 mila km anche in 10 giorni, quindi vanno proprio a 11 m/s. Comunque se il palloncino saliva $v=5\text{cm/s}$ è ragionevole, perché dopo lo slancio iniziale piano piano comincia a rallentare...e 5 cm/s sono sempre 3 metri al minuto...Ovviamente mi si può dire che i bambini non lanciano palloncini la mattina di venerdì, e allora l'ipotesi 3.4 è senz'altro quella di un oggetto governato da un'intelligenza aliena, visto che è apparso all'improvviso, si muoveva lentamente, e poi ci è stato sottratto alla vista dalle nubi.

Da Vulcano agli alieni il passo è stato breve.

Siamo passati per l'asteroide del giorno del giudizio, grande come Villa Pamphili al limite delle orbite geostazionarie, al vuoto delle orbite sublunari, alle velocità quasi relativistiche necessarie perché l'oggetto sia in orbita attorno al Sole.

E' stato emozionante vedere il fenomeno.

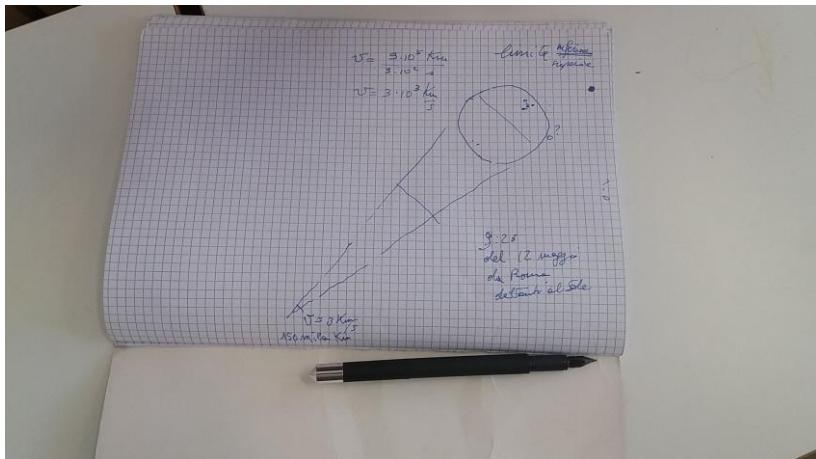


Fig. 2 Schema geometrico discusso più sopra.

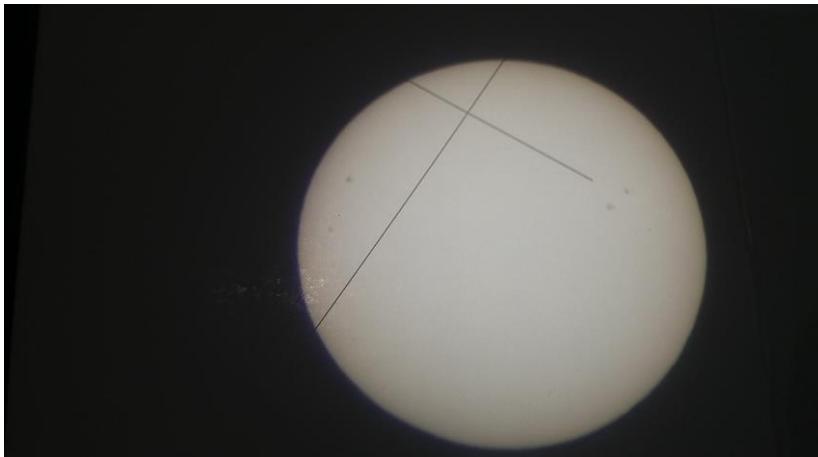


Fig. 3 Il Sole il 12 maggio alle 13:34 UT: presso le macchie di sinistra è apparso il corpo in transito alle 7:28 UT. Quelle regioni attive sono piuttosto grandi, la più grande è attorno ai 33'' inclusa la penombra, da questa immagine. Le dimensioni del corpo in transito erano simili, e la velocità apprezzabile: in qualche secondo si spostava della sua dimensione $\omega = 33''/2 \div 3$ s ossia $\omega = 11'' \div 16''/s$. Vulcanoidi, se ve ne fossero, sarebbero molto più piccoli e di magnitudine 8.0 (Steffl et al. 2010 grazie alle osservazioni col satellite STEREO-Secchi)

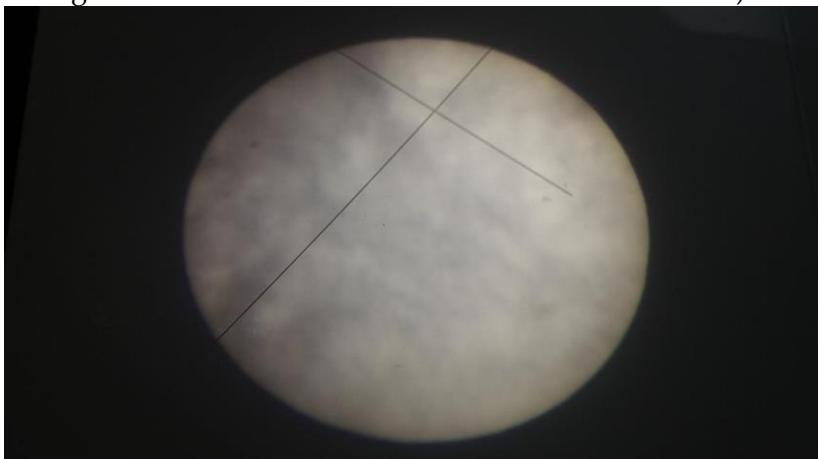


Fig. 4 Il Sole 30 s dopo la foto 3, avevamo nuvole per tutto il dì.



Fig. 5 Teodolite Officine Galileo da 46 mm adattato per l'osservazione solare. Il cartonicino attorno all'oculare serve a bloccare la luce diretta del Sole sullo schermo di proiezione.



Fig. 6 Foto del pallone SuperBIT presa in Cile il 7 maggio 2023.
Fonte www.spaceweather.com

Referenze: A. J. Steffl et al., Bull. Am. Astr. Soc. **42**, 1052 (2010).

Il Sole nei Gemelli 2023: un'eclissi post-meridiana

Costantino Sigismondi prof.sigismondi@icra.it

(*ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma*)

Submitted May 21st 2023, revised and accepted May 22nd

Abstract The ingress' days in Gemini has been observed on the meridian line of St. Maria degli Angeli on May 22nd 2019 and May 21st 2023, when an unique eclipse-like phenomenon was produced by the Vanvitelli's trabeation right after the meridian transit. The geometrical phenomenon is discussed.

Sommario Nei giorni dell'ingresso del Sole nei Gemelli abbiamo osservazioni del 22 maggio 2019 e 21 maggio 2023, quando si è prodotta un'eclissi artificiale con la trabeazione di Vanvitelli, subito dopo il transito meridiano. Il fenomeno geometrico è descritto e discusso.

Keywords: Zodiacal signs, Celestial mechanics, Clementine Gnomon, Tropical year, Julian year, Gregorian year.

Introduzione: Alle 9:09 del 21 maggio 2023 le effemeridi del Sole danno l'ingresso nei Gemelli. Questo significa che la longitudine eclittica geocentrica ha raggiunto il valore $\lambda=60^\circ$. In pratica il Sole ha coperto già 2/12 della sua orbita vista dal centro della Terra, a partire dall'equinozio di Primavera. Questa è meccanica celeste, niente a che fare con previsioni astrologiche sul presente, passato e futuro delle persone.

A s. Maria degli Angeli i riquadri dei segni zodiacali centrati sulla posizione che il centro del Sole avrebbe al momento dell'ingresso in ciascun segno: **Fig. 1: Gemelli 21/5/23 12:53:20**



Differenza tra 1701 e 2023 nell'obliquità. L'asse terrestre negli ultimi 322 anni ha continuato a cambiare l'inclinazione passando da $23^{\circ}28'40''$ a $23^{\circ}26'20''$, $2'20''$ di diminuzione.

Sulla meridiana ciò ha comportato un avvicinarsi all'equatore di tutti i riferimenti corrispondenti ai segni zodiacali, in una misura che dipende dall'angolo zenitale del Sole. Al solstizio estivo sono 20 mm, ai Gemelli poco meno.

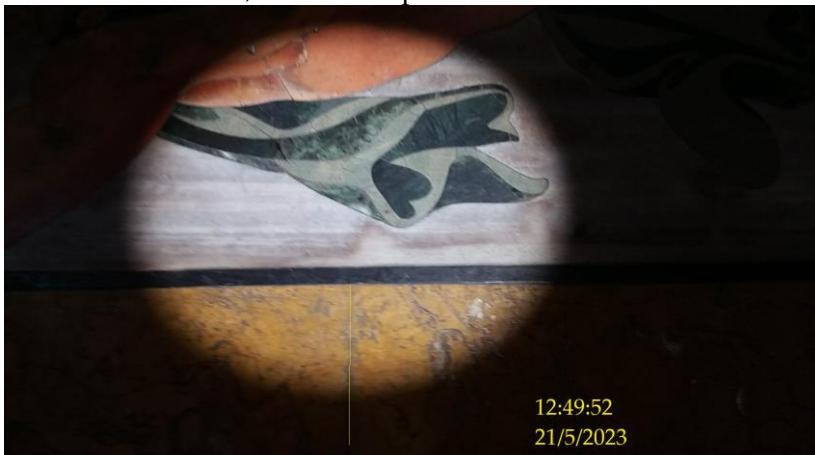


Fig. 2 L'equatore è a sinistra. Il centro del Sole è leggermente a sinistra $35''$ del centro del riquadro, da 3h 30min già in Gemelli

Dati al transito meridiano: i contatti simmetrici sono avvenuti

Esterno-Interno linea	13:05:29.0	13:08:09.5	13:06:49.3
Centro linea	13:05:42	13:07:58	13:06:50
Interno-Esterno linea	13:05:46.6	13:07:49.8	13:06:48.5

Il passaggio secondo le effemeridi già con la deviazione generale di $5'11''$ verso Est era previsto alle 13:06:46. Il dato osservato è circa 2.5 secondi in anticipo. Anche qui può esserci una traccia del seno Boscoviciano, ma non ad occhio 13:06:45.5

Dati del 22 maggio 2019 il centro del Sole era 85.5 mm a destra della linea dei Gemelli (in giallo in fig. 2) mentre il 21/5/2023 è 2.5 mm a sinistra. Il diametro era 229 mm inclusa la penombra di 25 mm. L'eclissi del fregio nel 2019 ci fu, ma asimmetrica (Yin e Yan). Dovuta ad un bordo semicircolare di circa 10 mm,

posto ad 1 m dal foro stenopeico lungo la linea di vista col Sole **Eclissi centrale post-meridiano** del 21 maggio 2023. Può verificarsi anche attorno al 23 luglio, data quasi simmetrica, ma le condizioni geometriche per il perfetto allineamento sono passaggio al meridiano 4 ore dopo l'ingresso nei Gemelli o prima di quello nel Leone. Tra ingresso nei Gemelli e ingresso nel Leone, per la seconda legge di Keplero, passano 63 giorni - 5h 19 m. In un giorno il Sole fa circa 11.4' ossia 76 mm. L'allineamento perfetto di fig. 3 si ha entro ± 1 mm.



Fig. 3 Fenomeno di eclissi centrale dopo il passaggio meridiano del 21/5/2023 alla Meridiana Clementina.

Negli altri casi si hanno configurazioni come lo "Yin-Yan", fotografate il 20 e 22 maggio 2021 e il 22 maggio 2019.

Statisticamente sono 2 mm su 76 mm ossia 1/38 dei passaggi del 21 maggio che possono andare bene. Il passaggio del 22 maggio avviene 76 mm più giù, verso il numero 39 di fig. 3.

Ogni 4 anni c'è il "*drift Giuliano*", ossia, con il bisestile, il Sole torna in meridiano 4 volte 365 g 6h dopo, ma mancano 44 minuti a completare esattamente l'anno tropico. In capo a 131 anni questo ritardo diventa 1 giorno, cioè 76 mm, ossia 11.4'.

Il *drift Giuliano* vale perciò $2.32 \text{ mm} = 0.348'$ ogni 4 anni, verso l'alto di fig. 3, ossia verso declinazioni più piccole a Maggio, e verso il basso e declinazioni più grandi a Luglio.

A causa del *drift Giuliano* la configurazione tra quattro anni non sarà più perfetta come quella del 2023, così come non lo fu quella del 2019. Dunque se fissiamo una fascia di 2 mm entro

cui accettare le condizioni per l'eclissi centrale, abbiamo un solo evento nel secolo: il 21 maggio 2023. L'immagine del Sole si sposta nella direzione meridiana di 3.2 mm all'ora. Un altro modo di vedere il problema è che il passaggio meridiano giusto può avvenire entro ± 20 minuti dalle 4 ore dall'ingresso in Gemelli, o anche che la longitudine del Sole in meridiano deve essere $\lambda=60^\circ 10.00' \pm 0.83'$, oppure verso il Leone: $\lambda=119^\circ 50.00' \pm 0.83'$. Ci sono in tutto 80 minuti in un anno nei quali il Sole si trova in quelle longitudini, e devono capitare al meridiano. I Gemelli escludono il Leone, per via delle 5:19 ore di differenza con 63 giorni interi. La declinazione $\delta=20^\circ 11'$ del **21 maggio 2023** diventa $\delta=20^\circ 16.3'$ il 22 luglio 2023. Nel **2042** e nel **2046** sarà $\delta=20^\circ 11' \pm 20''$ **il 22 luglio**. Nel 2096 il 21 luglio sarà a $\delta=20^\circ 11' 30''$, appena fuori del valore richiesto, ma nel 2100 l'assenza Gregoriana del bisestile taglierà fuori il 21 luglio. Il **21 maggio 2027** $\delta=20^\circ 11' 20''$ ancora accettabile. $\delta=20^\circ 11' \pm 20''$ sarà anche il **20 maggio 2056 e 2060**. In tutto 4 date a maggio e 2 a luglio, per tutto il secolo XXI.

Conclusioni l'evento simile ad un'eclissi centrale osservato il 21 maggio 2023 a s. Maria degli Angeli alle 13:10 è avvenuto con il Sole a $20^\circ 11'$ di declinazione, e può ripetersi se il Sole, in meridiano, passa con $\delta=20^\circ 11' \pm 20''$. Le condizioni valide per il 21/5/23 si ripetono solo 6 volte nel XXI secolo, per avere il Sole in meridiano con l'altezza giusta per produrre l'eclissi centrale artificiale. La tolleranza di $\pm 20''$ e la velocità di $11.4'$ al giorno con il *drift Giuliano* di $0.348'$ ogni 4 anni, determinano queste frequenze. Il Sole ha $\delta=20^\circ 11'$ due volte l'anno, 1 volta su 72 capita nei 20 minuti al meridiano: 36 anni il tempo di ritorno.

Referenze: C. Sigismondi [Il Sole nei Gemelli](#) (2019). C. Sigismondi, <https://youtu.be/ciR7-kM6Wjo> (22 May 2019). C. Sigismondi, Gerbertus **14**, 181-184 (2021), con foto del 2019/21. C. Sigismondi <https://youtu.be/m263Xf1CU9c> Eclissi (2023) C. Sigismondi <https://youtu.be/lvxTWYRexq0> Transito (2023)

Gli uragani come macchine termiche

Kerry Emanuel <https://emanuel.mit.edu/> (MIT/Boston USA)

Original published on web 23 July 2019, translated: June 17th 2023

Abstract The hurricanes as thermal engines are models very much credited to predict the intensification of them in global warming. The interview of prof. K. Emanuel published in the Annenberg Learner website contains the basics for understanding the model of the thermodynamical cycle, and its limitations and it is proposed in Italian language. The variability of the last 4 millenia in the hurricanes' intensity is also devised, as well as the role of the hurricanes in the World's climate balance.

Sommario L'intervista per il sito Annenberg Learner del prof. K. Emanuel, esperto Americano di uragani, è tradotta in Italiano per disporre di idee chiare e semplici sulla trasformazione da energia termica in cinetica, mediante un ciclo termodinamico che si svolge tra la superficie dell'oceano e la stratosfera. Il modello è una semplificazione della realtà, ma aiuta a capire anche le basi teoriche della intensificazione degli uragani con il riscaldamento globale, presentando anche la loro variabilità secolare negli ultimi 4 millenni, cruciale nell'attuale dibattito scientifico e mediatico. Il ruolo degli uragani nel bilancio climatico della Terra è tratteggiato.

Keywords: Hurricane, Carnot heat engine, Wind energy, Deep convection.

Introduzione: Questo articolo viene proposto all'attenzione del pubblico italiano che non ha a che fare con gli uragani, anche se si parla già di *Medicanes*, *Med(iterranean hurri)canes*, che capitano in autunno, quando lo sbilanciamento termico tra acqua e aria è massimale, al termine del riscaldamento estivo. Anche la formazione di una cella temporalesca, da un cumulonembo, ha in sé gli elementi fisici di base che stanno dietro ad un uragano, sia pure su scala molto minore.

Intervistatore: Vorrei iniziare chiedendoti come ti sei interessato per la prima volta al fenomeno meteorologico. Riesci a ripensare a ciò che ha reso questo un interesse per tutta la vita per te?

KERRY: Come è vero per molte persone nel mio campo, mi sono interessato ad esso da bambino. Sono cresciuto nel New England. E il meteo in New England presenta molta varietà. È molto variabile. E mi sono interessato al fenomeno meteorologico. Volevo capire come funzionano le varie cose.

Intervistatore: C'è un momento particolare in cui hai iniziato a considerare gli uragani come un fenomeno interessante?

KERRY: Sì, effettivamente. Questo è un classico esempio di come a volte ti interessi a qualcosa dovendolo insegnare. E uno dei motivi per cui l'insegnamento e la ricerca vanno così bene insieme è che, *spesso, pensi di capire qualcosa. Solo quando devi insegnarlo, però, capisci che non lo capisci.*

E questo mi è successo nel caso degli uragani. Così mi è stato chiesto di tenere un corso di meteorologia tropicale. Pensavo di aver capito come funzionano gli uragani. Sapevo quale fosse la spiegazione convenzionale. Così ho iniziato a insegnarlo. E ho avuto una di quelle esperienze orribili in cui inizi a parlare di qualcosa, e ti rendi conto che non ha davvero alcun senso. E questo ti porta lungo un percorso di cercare di capire cosa ha senso. E questo è ciò che chiamiamo ricerca.

Intervistatore: Hai mai visto come gli uragani vengono solitamente insegnati a scuola ai bambini? E come questa descrizione potrebbe essere ampliata?

KERRY: Beh, sì. Penso che in quasi tutte le presentazioni di cui sono a conoscenza, che siano in televisione, in un film documentario o in un libro di testo, sia molto descrittivo. Questa è una sequenza di eventi che osserviamo accadere che porta a un uragano. E non è davvero esplicativo. *C'è molto poco che dice: "Beh, questo è il motivo per cui sta accadendo. Questa è la fisica che c'è dietro".* Quindi, vedo che manca in molti dei programmi sugli uragani.

Intervistatore: Approfondiamo un po' questo aspetto. Da un punto di vista fisico, cos'è un uragano?

KERRY: Bene, *da un punto di vista fisico, un uragano è un motore termico.* È una macchina massiccia e naturale per convertire l'energia termica in energia meccanica, l'energia meccanica è l'energia del vento. E l'energia termica deriva

dall'oceano, e in particolare dall'evaporazione dell'acqua dell'oceano. Ora, non è sempre chiaro alle persone che quando si fa evaporare l'acqua, questo corrisponde in realtà a un trasferimento di energia. Eppure tutti noi abbiamo quell'esperienza.

Ad esempio, quando esci da una piscina in una giornata ventosa, anche se fa caldo, potresti sentire freddo per un po' perché **l'acqua sta evaporando dalla tua pelle** e sta togliendo calore dal tuo corpo. E quando l'acqua evapora dall'oceano, toglie calore dall'oceano. E quel calore viene effettivamente aggiunto all'atmosfera, ed è una **forma di calore che chiamiamo "latente"**, perché non è davvero evidente. Si esprime nel contenuto di vapore acqueo dell'aria.

Ora, **più tardi, quando quel vapore acqueo si condensa in piccole gocce di acqua liquida che chiamiamo "nuvola", quel calore viene rilasciato e riscalda l'aria.** E quindi è la quantità formidabile di calore rilasciata nel nucleo interno di un uragano dove tutto questo vapore acqueo si condensa. Questa è la cosa prossima che guida questa grande circolazione.

Intervistatore: Puoi parlare un po' di come viene convertito il calore?

KERRY: Permettetemi di tracciare un'analogia che è molto più familiare alle persone nella vita di tutti i giorni, che è un'automobile. Un'automobile è una macchina che converte, in definitiva, l'energia chimica, l'energia immagazzinata nella benzina, prima in energia termica quando si verifica una piccola esplosione in miniatura all'interno del cilindro del motore. E poi quell'energia termica viene convertita in energia meccanica che è il movimento dell'auto.

Ora, quando si preme sull'acceleratore, l'auto sta accelerando. È questa energia che viene utilizzata per accelerare l'auto. Quando stai percorrendo l'autostrada a 100 km all'ora, e non stai più accelerando, stai ancora bruciando energia. È tutta

l'energia necessaria per superare l'attrito dell'auto che si muove lungo la strada e l'attrito dell'aria che si muove oltre l'auto. C'è un'analogia con un uragano. **Un uragano gira e raggiunge una certa intensità massima. E a quel punto, non sta più crescendo.** Ma c'è un'enorme quantità di attrito, dei venti che soffiano sulla superficie della terra. Ed è **l'energia termica su cui prospera l'uragano** che, in questo caso, viene **prima convertita in energia meccanica dei venti e poi dissipata dall'attrito.** E la dissipazione, tra l'altro, trasforma l'energia in calore. Attrito, ti strofini le mani insieme, si surriscaldano. **L'attrito provoca calore. Quindi è un ciclo.**

Intervistatore: Quindi, quando si sperimentano i venti di un uragano più veloci e pesanti, c'è attrito lì e si sta riscaldando.

KERRY: Giusto. Parte dell'acqua che è evaporata dall'oceano e che trasferisce calore nell'aria, parte di quel calore viene utilizzata per spingerti. È l'energia che viene utilizzata per spingerti o trascinarti sul terreno se non riesci a stare in piedi con venti così forti. Possiamo parlare dell'energia che viene dissipata in un uragano in termini quantitativi. E il numero che mi piace, perché è quasi esatto, è che, per un uragano medio, non particolarmente grande, non particolarmente potente, la quantità di energia che viene dissipata, per attrito, che è uguale alla quantità di energia termica che viene pompata in questa tempesta, sembra essere quasi esattamente uguale alla velocità media con cui gli Stati Uniti usano l'energia elettrica. Quindi l'intera capacità di generazione degli Stati Uniti (MegaWatt) equivale a quella di un uragano.

Intervistatore: In che modo un uragano è come un motore termico?

KERRY: Uno dei principi che è stato stabilito nei primissimi giorni della termodinamica, **a metà del 19° secolo**, principalmente dai francesi, era che si poteva prendere solo una frazione di energia termica e trasformarla in energia

meccanica. E questa frazione è chiamata "efficienza". E questa teoria è stata sviluppata da un termodinamico francese di nome **Sadi Carnot**. Ed è per questo che molti motori termici, ancora oggi, sono chiamati motori di Carnot.

E questa frazione è proporzionale alla differenza tra la temperatura alla quale il calore viene immesso nel sistema e la temperatura alla quale, alla fine, viene estratto. Quindi, iniziamo con un semplice esempio. In realtà, non è affatto semplice, ma familiare. Un esempio familiare è un'auto. Ora, il calore viene aggiunto all'interno del cilindro del motore dove la temperatura è molto, molto calda a causa di tutte le esplosioni di vapore di gas e miscela di ossigeno lì dentro.

E il calore viene infine tolto dall'auto dal radiatore. Il radiatore potrebbe funzionare a una temperatura pari a qualsiasi temperatura esterna, sempre inferiore alla temperatura all'interno del cilindro. Quindi maggiore è la differenza di temperatura, maggiore è la frazione dell'energia termica totale che puoi trasformare in energia meccanica. Questo è un limite superiore. Esistono tutti i tipi di altre inefficienze nel sistema.

Ora, un uragano è anche un motore termico. E la temperatura alla quale il calore è immesso è la temperatura dell'oceano, in media circa 30 °C. Quindi, nel caso di un uragano, è anche un esempio di motore termico. Il calore viene immesso nel motore alla temperatura dell'oceano, la superficie dell'oceano, che è di circa 30°C - 28 °C. E l'aria scorre lungo la parete oculare dell'uragano, un anello di temporali molto forti che circonda l'occhio. E poi esce all'altitudine molto più alta della parte superiore dell'atmosfera dove le temperature sono molto, molto fredde. Alcune delle temperature più fredde che puoi trovare ovunque nell'atmosfera, ironicamente, sono ai tropici, a circa 16 chilometri sopra la superficie. E le temperature sono basse: fino a -80 °C.

Quindi c'è una grande differenza di temperatura che agisce attraverso l'uragano. E per questo motivo, l'uragano è un motore termico abbastanza efficiente, come i motori termici naturali. **Stai convertendo circa un terzo dell'energia termica che stai ricevendo dall'oceano in energia eolica.**

Intervistatore: Qual è la fonte ultima dell'energia che aziona questo motore termico? In che modo è correlato all'effetto serra?

KERRY: La fonte ultima di energia per tutto, virtualmente, che accade nell'atmosfera è il Sole. E infatti, è il Sole in combinazione con l'effetto serra. E non avremmo uragani se non fosse per l'effetto serra, tra l'altro. Ecco come funziona. La luce del Sole riscalda l'oceano. E se non ci fosse atmosfera, l'oceano si libererebbe del suo calore semplicemente emettendo radiazioni – si chiama "radiazione infrarossa", radiazione che non puoi vedere – nello spazio. E sarebbe un semplice equilibrio. Questo è, ad esempio, l'equilibrio che esiste sulla superficie della Luna e il suolo che è rivolto verso la luce del Sole. E la Luna ha una certa temperatura che si può facilmente calcolare, quindi emette tanta radiazione quanta ne riceve dal Sole.

Ma la Terra ha questa bella coltre di gas intorno ad essa. E alcuni di questi gas sono gas serra molto importanti, il vapore acqueo è il più importante, e anche l'anidride carbonica, il metano. E quei gas assorbono parte del calore che risale dal pianeta, e poi lo re-irradiano verso la superficie.

E così, ai tropici, c'è così tanto vapore acqueo che l'oceano scopre che non può davvero liberarsi del calore che riceve dal sole irradiandolo nello spazio. Quindi, invece, il calore viene portato via dalle correnti d'aria. L'aria che sale da vicino alla superficie dell'oceano è un po' più calda e molto più umida dell'aria che scende nelle correnti discendenti. Quindi l'aria sta portando via il calore.

E per farlo, l'aria a contatto con l'oceano non deve essere satura di vapore acqueo. La sua umidità relativa deve essere inferiore al 100%, in modo che ci sia un potenziale di evaporazione. Ed è **questo potenziale di evaporazione che guida gli uragani**. È anche il motivo per cui gli uragani tendono ad essere più intensi e frequenti alla fine dell'estate e all'inizio dell'autunno, quando la temperatura dell'oceano è al massimo e questo squilibrio tra l'oceano e l'atmosfera è anche al massimo.

Quindi, se non fosse per l'effetto serra, non avremmo problemi con gli uragani. Una delle tante cose di cui siamo preoccupati, se dovessimo avere un qualche tipo di riscaldamento globale perché l'effetto serra è in aumento, è che **gli uragani potrebbero essere un po' più intensi in un mondo più caldo**.

Intervistatore: Come variano le temperature in un uragano, verticalmente, dalla superficie dell'oceano verso l'alto?

KERRY: Se guardi una fotografia di un uragano dallo spazio, quello che vedi, ovviamente, è questa bellissima massa bianca a spirale di nuvole. È un po' difficile da dire, ma quelle nuvole si estendono da molto vicino alla superficie dell'oceano fino a circa 16 km di altezza. E la superficie dell'oceano è ad una temperatura piuttosto elevata. Se qualcuno è stato ai tropici, lo sa. È tra i 25 °C e i 30 °C. Ma le cime delle nuvole in un uragano rappresentano la temperatura che si trova nella parte superiore dell'atmosfera. Fa molto, molto freddo: circa -80°C. Ed è qualcosa che non molte persone conoscono, l'atmosfera tropicale. È vero ovunque nell'atmosfera. Diventa più freddo man mano che sali. Ecco perché c'è neve in cima al Monte Kilimangiaro (5895 m), che è quasi all'equatore. Ma se vai molto lontano, molto al di sopra delle cime delle montagne, è ancora più freddo. E può essere molto, molto freddo. Quindi, l'uragano sta operando su un gradiente piuttosto spettacolare, dalla superficie dell'oceano alla cima della tempesta.

Intervistatore: Potresti descrivere il processo di formazione degli uragani?

KERRY: In effetti, la generazione di uragani, che chiamiamo la **"genesi degli uragani"**, rimane uno dei problemi più enigmatici della scienza atmosferica. Non capiamo davvero come funziona. Ma questo è ciò che vediamo quando guardiamo cose come immagini satellitari o sequenze di immagini. In genere la **prima cosa** che vedi è un gruppo di temporali, o ciò che chiamiamo "rovesci convettivi". Si tratta di **grandi cumulonembi** che piovono, molto comuni ai tropici. E di solito sono sparpagliati, e sono **un po' disorganizzati**.

E quello che vedete è che iniziano a formare grumi. E ogni tanto, i grumi inizieranno a mostrare alcuni **segni di rotazione**. E poi, col passare del tempo, si organizzano in una specie di anello, un **anello di convezione a forma di ciambella**. E mentre i venti si intensificano in superficie, spesso si svilupperà un occhio, una regione chiara forse 30-50 km al centro dove le nuvole se ne vanno, e ti rimane questa massa di nuvole molto più organizzata, molto più simmetrica. Ora, comprendiamo che una volta avviato questo processo, il feedback che consente all'uragano di crescere è tra vento ed evaporazione. Abbiamo appena discusso poco fa che la principale fonte di energia per un uragano è l'evaporazione dell'acqua. Ma proprio come senti più freddo quando esci da una piscina in una giornata ventosa rispetto a una giornata calma, la velocità con cui il calore entra nell'atmosfera è una funzione della velocità del vento. **Più forti sono i venti, più calore hai in atmosfera**. Quindi hai questo ciclo. **Più forti sono i venti dell'uragano, maggiore è l'evaporazione**. Maggiore è l'evaporazione, più calore entra nell'uragano. **Più calore va nell'uragano, più forte diventa**. E questo sarebbe andato avanti per sempre. Ma c'è un'altra cosa che gli **impedisce di farlo**. È **attrito**. E l'attrito aumenta ancora più

velocemente con la velocità del vento rispetto all'evaporazione. E alla fine, smaltisce il calore. E a quel punto, l'uragano smette di crescere.

Cosa c'è di misterioso in questo – penso che capiamo abbastanza bene questo processo, tra l'altro. – è il modo in cui tutto è iniziato. E ora **ne sappiamo abbastanza per sapere che non inizia spontaneamente**. Cioè, **una farfalla che sbatte le ali da qualche parte nella parte occidentale dell'Africa non è in grado di iniziare un uragano**. Un uragano è più simile a un tosaerba, nel senso che il tuo tosaerba è seduto nel garage. Ha la benzina pronta in esso. E tutto è oliato. Le candele sono buone. Ma fortunatamente per voi e per me, tranne forse nei film horror, il tosaerba non parte spontaneamente. Devi andare oltre e dare alla corda una buona tirata. E tutti quelli che hanno provato a farlo sanno che se la tua trazione è troppo anemica, non parte.

Anche gli uragani sono così. Devi avere qualche altro tipo di tempesta che non ha nulla a che fare con la fisica di cui abbiamo parlato, che arriva e dà una spinta sufficientemente forte all'atmosfera. E capiamo perché è vero. Ma quello che non capiamo è come tutto riesca ad accadere. Ed è raro, per fortuna. Non succede così spesso.

Intervistatore: Parlaci un po' di alcuni degli effetti di un uragano quando colpisce la terra, nell'approdo. **Come riconosceresti, se fossi in piedi sulla spiaggia, che era un uragano, e non solo una tempesta** o qualcosa del genere?

KERRY: Bene, **un uragano è probabilmente la tempesta più potente sulla Terra**. Le velocità del vento non sono così elevate come un tornado, ma sono molto più estese. Un tornado copre poche centinaia di metri, mentre un uragano si estende per molte, molte decine e centinaia di chilometri. E quando un uragano si avvicina alla riva, ci sono varie cose che accadono.

La prima indicazione che qualcosa di brutto sta accadendo in

mare è che queste **onde terrificanti iniziano ad arrivare a riva, molto prima che ci sia vento**. Le onde in genere superano la velocità di spostamento dell'uragano. E, ai vecchi tempi, prima che avessimo satelliti e aerei, quando non sapevamo davvero cosa stesse succedendo in mare, i meteorologi facevano molto affidamento su questo.

C'è la famosa storia dell'uragano di Galveston che è commemorata in questo meraviglioso libro intitolato Isaac's Storm su Isaac Cline,¹ che era il meteorologo in servizio a Galveston nel 1900. E, sebbene avesse notizie da Cuba che c'era un uragano lì, non avevano modo di sapere veramente se stava arrivando nel Golfo del Messico. La prima volta che si è davvero insospettito è stato quando queste enormi onde hanno iniziato ad infrangersi sulle spiagge di Galveston. E cominciò a pensare: "Oh mio Dio. Qualcosa sta per accadere". Questa è la prima cosa che succede.

Poi, naturalmente, **il cielo verso il mare diventa molto scuro**, mentre la massa centrale di nuvole si avvicina alla riva. Il **vento aumenta gradualmente**. Di solito non è un aumento molto improvviso del vento. **Inizi ad avere raffiche di pioggia, le bande a spirale degli uragani. Quindi la pioggia va e viene, e il vento aumenta gradualmente.**

E poi, **quando la parete oculare si avvicina alla riva, i venti iniziano ad aumentare molto, molto velocemente**, e in particolare se l'uragano si muove velocemente. E l'altra cosa che succede è, naturalmente, che **le onde diventano sempre più grandi**. Ma le onde si sovrappongono a un altro fenomeno che chiamiamo "**storm surge**", che è un'elevazione generale **dell'acqua**, che è causata dall'effetto netto dei venti che spingono tutta quest'acqua a riva.

E c'è un altro piccolo contributo proprio dal fatto che la pressione al centro dell'uragano è molto bassa. In realtà tira un

¹ [La tempesta di Isaac - Wikipedia](#)

po' su la superficie dell'oceano. Quindi questo grande muro d'acqua invade l'entroterra. E può essere alto 6-9 metri in casi estremi. E storicamente, è questa ondata di tempesta che ha ucciso la maggior parte delle persone e, in molte tempeste, fa il maggior danno.

L'altro fenomeno con cui molte persone non hanno familiarità è l'enorme quantità di spray che vengono sollevati nell'aria in un uragano. Quando i venti iniziano a scorrere più di circa 130-150 km all'ora, così tanti spruzzi vengono sollevati nell'aria che, alla fine, diventa difficile persino parlare di una superficie dell'oceano. E non sto parlando metaforicamente. Si passa semplicemente dall'aria che è piena di bolle all'acqua che è piena di bolle all'aria che viene riempita gradualmente di spray. E non c'è più nulla che si possa chiamare la superficie dell'oceano. Quindi diventa un vero caos nel cuore di un uragano.

Intervistatore: E l'occhio dell'uragano?

KERRY: Beh, certo, c'è un sacco di tradizioni sull'occhio. E, visivamente, l'occhio è il posto più spettacolare in cui stare, in particolare se sei in aereo. Quello che succede è che, proprio quando i venti raggiungono il loro stato più feroce, inizieranno improvvisamente a diminuire. E, in una tempesta molto, molto intensa come l'uragano Andrew,² quel declino può essere molto rapido. Quasi in pochi minuti, il vento cala. Il cielo potrebbe schiarirsi. Anche se di solito, ci sono molte nuvole basse in giro. Puoi vedere il Sole di tanto in tanto e poi sbirciare tra le nuvole, il che è un peccato. Perché se non fosse per le nuvole basse, potresti vedere questo muro di nuvole che ti è appena passato sopra, e sarebbe molto spettacolare. Lo so perché l'ho visto da un aereo.

I venti calano. E ai vecchi tempi, prima ancora che la gente capisse davvero che gli uragani erano tempeste rotanti, molte

² [Uragano Andrew - Wikipedia](#) (1992)

persone venivano uccise perché pensavano che la tempesta fosse finita. Così sono usciti, e hanno cercato di iniziare a raccogliere dopo tutti i danni, solo per essere colpiti dall'altra parte della tempesta. Oggi, la maggior parte delle persone lo capisce e questo non accade.

Ma ci sono ogni sorta di altre cose folli che accadono negli occhi. Gli uccelli in mare a volte rimangono intrappolati negli occhi. E, poiché è così violento nella parete oculare, non possono davvero uscire. E se l'uragano va a latitudini molto alte, porta con sé tutti questi uccelli tropicali. In modo che di tanto in tanto, alcune specie tropicali di uccelli appariranno a Terranova o da qualche parte.

E se una nave capita di essere erroneamente catturata nell'occhio di una tempesta, cosa che non accade più molto a causa dei buoni avvertimenti che ricevono, allora questi uccelli – uccelli esausti – atterrano sugli alberi della nave. Ci sono fotografie di queste petroliere negli occhi degli uragani completamente coperti di uccelli che stavano cercando di riposarsi.

Intervistatore: Come puoi prevedere l'intensità di un uragano mentre si evolve?

KERRY: Bene, quando abbiamo iniziato a considerare l'intera faccenda di trattare gli uragani come sistemi, una delle cose che ne è venuta immediatamente fuori è che ci siamo resi conto che **per un dato ambiente atmosferico, in una data temperatura oceanica, c'era una velocità massima del vento che si poteva raggiungere in un uragano**, che possiamo facilmente calcolare se solo conosciamo il tipo di proprietà medie dell'atmosfera tropicale nel mondo. oceano. È un limite di velocità.

E, in un certo senso, funziona molto bene. Cioè, se si guardano le effettive velocità del vento osservate in un sacco di uragani diversi, e si confrontano quelle velocità del vento con questo

limite, in effetti, nessuna tempesta supera mai questo limite. E solo una percentuale molto piccola di loro arriva effettivamente fino al limite. La maggior parte di loro non è all'altezza. Una delle cose interessanti che ci è successa quando abbiamo fatto questo è che abbiamo iniziato a costruire modelli computerizzati di uragani. E, infatti, ho un tale modello che distribuisco gratuitamente agli insegnanti che può essere eseguito su un normale personal computer.³ E i modelli computerizzati si comportavano, in qualche modo, in modo molto diverso dai veri uragani in quanto arrivavano sempre al loro limite di velocità, a meno che non accadesse loro qualcosa di veramente terribile, come l'approdo a terra. All'inizio non l'abbiamo capito. Gli uragani informatici ideali raggiungono sempre il loro limite di velocità. Ma quelli veri raramente ce l'hanno fatta. Anche se guardi i veri uragani che rimangono sopra le calde acque tropicali e non atterrano, di solito non raggiungono nemmeno il limite. E abbiamo iniziato a chiederci perché. Una delle prime cose che ci è venuta in mente è che nei modelli idealizzati, manteniamo fissa la temperatura dell'oceano. Non lasciamo che cambi. Ma un vero uragano cambia profondamente la temperatura dell'acqua del mare, non perché sta togliendo calore dall'oceano. Lo sta facendo e questo raffredda l'acqua. Ma è forse un decimo di grado o giù di lì. Non è molto evidente perché l'oceano è un serbatoio di calore enorme. Quello che fanno i veri uragani è agitare l'oceano. E non devi andare molto lontano nell'oceano tropicale prima di trovare acqua molto fredda. Fa caldo solo entro i primi trenta metri circa dalla superficie.

Gli uragani arrivano e mescolano quest'acqua fredda portandola fino alla superficie. Puoi guardare un'immagine satellitare e vedere queste scie davvero fredde che vengono

³ <http://wind.mit.edu/~emanuel/home.html>

lasciate dagli uragani. E così l'uragano sta raffreddando la temperatura dell'oceano. E dovrebbe solo raffreddarlo di circa 2 °C proprio sotto la parete dell'occhio per "uccidere" l'uragano. Quindi anche una caduta di 1° C è importante.

Abbiamo imparato come includere questo effetto nei modelli di computer, incluso quello semplice che chiunque può eseguire. Abbiamo un modo di affrontarlo ora che, in effetti, prevede che la maggior parte degli uragani non raggiunga davvero il limite di velocità.

Intervistatore: Gli uragani si avvicinano mai al loro limite massimo teorico di velocità?

KERRY: È solo in circostanze molto eccezionali che lo fanno. Un caso famoso è l'uragano Camille,⁴ che è stato uno degli uragani più violenti che hanno colpito gli Stati Uniti nella storia. Nel 1969, arrivò ruggendo sul lato orientale del Golfo. E si è schiantato nel Mississippi con venti di qualcosa come 320 km all'ora. Questo è stato un po' strano perché nel Golfo del Messico, lo strato di acqua calda, il più delle volte, è molto, molto sottile. È profondo 20 o 30 metri. E normalmente, un uragano non sarebbe mai così intenso.

Ma c'è un fenomeno nel Golfo del Messico chiamato "corrente ad anello", che è una stretta corrente di acqua molto calda che scorre molto in profondità. Si chiama corrente ad anello perché risale attraverso il passaggio dello Yucatan fino a New Orleans. E poi fa solo un'inversione a U, scende appena al largo della costa occidentale della Florida, attraversa lo stretto della Florida e diventa la Corrente del Golfo. Quindi è un predecessore della Corrente del Golfo.

E abbiamo capito che quello che è successo con Camille è che per puro caso, Camille è andata proprio al centro di questa corrente circolare dove l'acqua calda scorre molto, molto profonda. E quindi non c'era acqua fredda da tirare su, che

⁴ [Uragano Camille - Wikipedia](#) (1969)

quindi non ha avuto questa influenza negativa sull'uragano, che poi è andato davvero in città. Ma ci sono anche altre cose. Una delle cose più misteriose è l'interazione degli uragani con altri sistemi meteorologici, in particolare se l'atmosfera ha quello che chiamiamo "**wind shear**" **gradiente del vento**, dove i venti di fondo, il vento normale di tutti i giorni che hai nell'atmosfera, cambiano con l'altezza, sia la direzione che / o la velocità. Quando gli uragani si spostano in ambienti in cui questo vento di fondo cambia con l'altezza, spesso si indeboliscono. E questo è osservato così spesso che ci possono essere pochi dubbi su di esso. Ma non comprendiamo molto bene il meccanismo. Ci sono tutti i tipi di speculazioni.

Tutto ciò ha portato al problema che non siamo molto bravi a prevedere il cambiamento di intensità degli uragani. Possiamo prevedere dove andrà abbastanza bene rispetto a molte altre cose che facciamo. Ma il cambiamento di intensità non è affatto buono. Quindi c'è ancora molta strada da fare per capire come le tempeste interagiscono sia con il loro ambiente atmosferico che con l'oceano.

Intervistatore: Puoi descrivere alcune delle attuali ricerche all'avanguardia che stai facendo ora e perché è importante per le persone?

KERRY: Stiamo lavorando su diversi aspetti del comportamento degli uragani che vanno dal microscopico fino al globale. Partendo dalla parte microscopica, se vuoi prevedere la velocità del vento degli uragani, devi sapere come il trasferimento di calore attraverso la superficie dell'oceano, l'evaporazione, dipende dalla velocità del vento. E sappiamo come funziona a basse velocità del vento, ma non capiamo davvero, né abbiamo misurazioni di, ciò che accade ad alta velocità del vento.

L'altra cosa che devi essere in grado di fare è prevedere la resistenza che l'oceano esercita nell'aria. E ancora, sappiamo

come prevederlo a bassa velocità del vento. Ma, ad alta velocità del vento, avremmo queste onde gigantesche. Non sappiamo come farlo. Tutto ciò che sappiamo finora ci insegna che la fisica che deve essere compresa riguarda gli spruzzi alla velocità del vento degli uragani.

Lo spruzzo marino, pensiamo, è fondamentale per un uragano. Quando una goccia di spruzzo sale ed evapora parzialmente, diventa molto fredda. Torna giù nell'oceano. Si scopre che il processo trasferisce un'enorme quantità di calore all'aria. E **così gli spruzzi marini sono un meccanismo di trasferimento del calore molto efficiente.**

Ma quando una goccia di spruzzo sale in aria, deve accelerare la velocità del vento. E così facendo, esercita un trascinamento nell'aria. Quindi è anche un importante pozzo di energia eolica per un uragano. E così abbiamo costruito un apparato di laboratorio in cui possiamo simulare queste condizioni fantastiche, velocità del vento molto elevate, aria che soffia attraverso l'acqua. L'aria è piena di spray. Stiamo cercando di misurare attentamente l'attrito e il trasferimento di calore dello spray. Ora, per passare all'estremità completamente opposta dello spettro, la gente si è preoccupata per alcuni anni se **il cambiamento climatico influisce sull'attività degli uragani.** Ci sono stati più o meno uragani durante l'ultima era glaciale, per esempio. Ci saranno più o meno uragani se **avremo il riscaldamento globale?** Ma pochissime persone si sono poste la domanda: "**Gli uragani giocano un ruolo centrale nel clima?**" Tendiamo a pensare a loro come tempeste strane che non influenzano davvero il clima in modo importante. I libri di testo, tra l'altro, sono pieni di cattive informazioni su questo; gli uragani trasferiscono molta acqua dai tropici al Polo. Non è vero. Sono attori minori nel bilancio idrico della Terra. Ma c'è qualcosa di piuttosto inaspettato che è emerso dalla ricerca: che **gli uragani possono avere un**

profondo effetto sulla circolazione globale dell'oceano.

L'oceano funziona in modo molto diverso dall'atmosfera. Ma ecco cosa sappiamo. **Di tutto il calore che viene trasportato sia dall'oceano che dall'atmosfera dai tropici verso i poli, in media circa un terzo viene trasportato dall'oceano e circa due terzi dall'atmosfera.** E quindi il clima sarebbe molto diverso se l'oceano non trasportasse tutto questo calore.

Ci sono molte discussioni su come funziona. Una delle teorie che sono state prese in giro negli ultimi giorni è che, stranamente, **sono gli uragani che permettono che ciò accada.** E le ragioni sono molto sottili. Ma in realtà è stato dimostrato circa cento anni fa che l'unico modo per far trasportare all'oceano molto calore dai tropici al Polo è se si potesse mescolare in modo turbolento l'acqua calda nei tropici nell'oceano tropicale profondo.

Gli oceanografi hanno discusso per anni su cosa stia facendo questo mescolamento. Abbiamo fatto alcuni calcoli che suggeriscono che l'attività globale dei cicloni tropicali (cyclone tropicale è un nome generico per un uragano) è ciò che sta facendo questo mix. Ora, se questo è vero, significa che dobbiamo ripensare completamente la nostra comprensione di come funziona il clima in generale. Perché nei grandi enormi modelli computerizzati che vengono utilizzati per simulare il clima, questa miscelazione è solo specificata. È costante. Non cambia con il tempo o il clima. È così specificato per ignoranza. Non sappiamo cos'altro fare.⁵

Se sono gli uragani a guidare questa miscelazione, abbiamo un problema diverso tutti insieme. Abbiamo una dinamica di sistema diversa perché gli uragani stessi sono funzioni del clima. E così, abbiamo costruito alcuni semplici modelli in cui permettiamo al clima di controllare gli uragani e agli uragani

⁵ Così il 23 luglio 2019, data della pubblicazione sul sito originale, rivista il 14 agosto 2019.

di controllare il flusso di calore nell'oceano. E otteniamo alcuni comportamenti molto interessanti che possono spiegare cose, per esempio, come il **clima di 50 milioni di anni fa**, quando i tropici avevano all'incirca la stessa temperatura di oggi, ma i **poli erano molto più caldi**. Invece di essere intorno a 0 °C, erano più vicini a 15 o addirittura 20 °C. Questo è quando **c'erano coccodrilli che vagavano per la Groenlandia**, e alligatori a Londra, e posti del genere. E questo è un grande mistero perché la distribuzione della luce solare sulla Terra non era sensibilmente diversa in quei giorni. Ma **pensiamo che fosse un clima molto tempestoso con molti uragani**, che stava guidando un fantastico flusso di calore polare nell'oceano che era **responsabile sia di mantenere i tropici relativamente freschi, sia di mantenere calde le alte latitudini**.

Questo è un nuovo ramo di ricerca che ora collega gli uragani all'intero sistema climatico in un modo che potrebbe rivelarsi molto interessante.

Intervistatore: Mentre lavoravi su questo, hai fatto sì che la tua visione del sistema di circolazione terrestre diventasse più una vista a volo d'uccello piuttosto che una vista microscopica?

KERRY: Penso che abbia funzionato in entrambe le direzioni. Per quanto mi riguarda, dal momento che sono stato in questo campo, che è ben oltre 20 anni, vengo da una prospettiva abbastanza ristretta di cercare di capire alcuni tipi di sistemi che vediamo nell'atmosfera. Ma questa comprensione ha portato – o il tentativo di raggiungere tale comprensione ha portato – sia verso il basso che verso l'alto. Da un lato, siamo costretti a studiare quelli che chiamiamo "processi microscopici", come come si forma una goccia di spray e si stacca, e quali leggi governano questo, fino a tutta questa faccenda globale di come tutto è interconnesso in un modo che controlla il clima?

E capire il clima è una questione davvero affascinante. È una scienza giovane. Ma nell'ultimo decennio o due, tutte queste carote di ghiaccio e sedimenti di acque profonde hanno fornito questa meravigliosa registrazione del clima che mostra un sistema molto, molto insolito e dinamico che stiamo solo iniziando a capire. Quindi, per chiunque inizi nella scienza, questo è un posto fantastico dove andare e fare scoperte.

Intervistatore: C'è qualcosa che volevi aggiungere che non ti abbiamo chiesto?

KERRY: C'è un altro ramo interessante della ricerca che può aiutarci a capire la relazione tra uragani e clima. È ciò che viene chiamato paleotempestologia. Questo è uno sforzo per ricostruire una registrazione a lungo termine della tempesta dalla documentazione geologica. Ci sono diverse tecniche, e una con cui ho familiarità prevede di andare in laghi [o lagune che sono vicino alla riva] ma che sono separati dall'oceano da un banco di sabbia. Ce ne sono molti lungo la costa del Golfo degli Stati Uniti e la costa orientale.

La natura di questi laghi è tale che quando arriva un uragano, e c'è un colpo diretto, lo **storm surge** fa scavalcare all'acqua il banco di sabbia nel lago, portando con sé molta sabbia. E così uno strato di sabbia si deposita sul fondo del lago. Ora, il resto del tempo, quando non c'è tempesta, è solo fango che si sta **accumulando, deposizione organica**, piante, piante in decomposizione e cose. Se andate nel lago con una barca e scavate nel fondo del lago, e prendete una **carota** e la esamineate, quello che vedete è un **sacco di fango nero con alcuni strati intermedi di sabbia**. Quegli strati di sabbia rappresentano gli attacchi degli uragani. Puoi usare una tecnica che ha a che fare con il decadimento radioattivo di alcuni isotopi e di questa materia organica per datarlo, in modo da poter scoprire quando quegli strati di sabbia sono

stati messi giù. Gli scienziati sono tornati indietro nel tempo di circa 4000 anni con questa tecnica. Ci sono alcuni posti lungo la costa del Golfo dove ora abbiamo qualcosa come un record di 4000 anni di attività degli uragani, il che è fantastico. Una delle cose che vediamo costantemente è che **il periodo tra circa 1000 anni fa e 3000 anni fa era molto più attivo rispetto ad oggi**. Ci sono stati molti più uragani di quanti ce ne siano stati negli ultimi 1000 anni.

Durante il periodo precedente a circa 3000 anni fa c'erano pochissime tempeste. Quindi ne avevamo pochissimi, poi ne avevamo molti. E poi negli ultimi 1000 anni, ne abbiamo avuti pochi in quella parte del Mondo.

Se lo stesso genere di cose può essere fatto dappertutto, potremmo costruire un record a lungo termine dell'attività degli uragani. E questo sarebbe un passo verso la comprensione di ciò che controlla il livello di attività degli uragani.



Fig. 1 Parete verticale della cella temporalesca, a Roma, sopra Monte Mario il 13 giugno 2023, appena un poco separata dalla nube a mensola che la precedeva, sulla sinistra. La descrizione dell'occhio del ciclone riportate da Kerry Emanuel calza anche per una fase dei temporali convettivi nostrani (C. Sigismondi).